

В.И.Лупандин

О.Е.Сурнина

ПСИХОФИЗИКА

Екатеринбург ♦ 1997

UNIVERSITY OF CHICAGO

LIBRARY

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации

Уральский государственный университет
им. А.М.Горького

В.И.Лупандин, О.Е.Сурнина

П С И Х О Ф И З И К А

Учебное пособие

Екатеринбург
1997

ББК Ю935. 11я73-1
Л85

Печатается по постановлению
редакционно-издательского
совета Уральского государствен-
ного университета

Лупандин В.И., Сурнина О.Е. Психофизика: Учеб. пособие.
Екатеринбург: УрГУ, 1997. 100 с.

Книга предназначена в первую очередь для студентов психологи-
ческих специальностей университетов. Тем не менее она может ис-
пользоваться и для специалистов - психологов, биологов, клиници-
стов, а также представителей других специальностей, которые хотят
самостоятельно ознакомиться с основами такой увлекательной нау-
ки как психофизика - науки о соотношении объектов и событий ок-
ружающего нас мира с внутренним, субъективным миром - миром
наших ощущений, восприятия, представлений и т.д.

Рецензенты: заведующий кафедрой высшей
нервной деятельности Санкт-Петербургского
университета, академик Российской академии
образования профессор А.С.Батуев;
кафедра естествознания и методики его
преподавания Уральского государственного
педагогического университета.

ВВЕДЕНИЕ

Психофизика - достаточно древняя область психологической науки, которая ведет свое начало с известной (если не сказать знаменитой) книги немецкого философа и психолога Густава Теодора Фехнера "Elemente der Psychophysik", вышедшей в свет в 1860 году. В своей книге Фехнер провозгласил создание новой, неведомой до тех пор науки - психофизики и достаточно четко определил ее цели и задачи. Психофизика была призвана изучать количественные соотношения "между телом и душой", т.е. между материальным и идеальным, между физическим и психическим.

Справедливости ради следует сказать, что так называемая психофизическая проблема - проблема адекватности субъективного отражения внешнего мира - своими корнями уходит в далекое прошлое. Ею занимаются философы, психологи, физиологи и представители других наук, начиная, пожалуй, со времен Аристотеля и Демокрита. Однако Фехнер был первым, кто вместо описательных методов и умозрительных спекуляций предложил строгий количественный подход к изучению психических процессов (в частности ощущений). Можно без преувеличения сказать, что фехнеровские "Элементы психофизики" наряду с "Физиологической оптикой" и "Физиологической акустикой" Гельмгольца совершили подлинный переворот в мировоззрении психологов и естествоиспытателей второй половины XIX столетия.

Судьба психофизики как науки достаточно сложна и запутанна. Сразу же после выхода в свет фундаментального труда Фехнера началась бурная полемика, вспыхнули ожесточенные споры как по поводу самого концептуального подхода, так и по поводу "основного психофизического закона" - универсального закона связи между раздражением и ощущением. Эти споры и дискуссии не стихают до сих пор, спустя почти полтора столетия.

После Фехнера психофизическую проблему стали разрабатывать в различных психологических лабораториях в разных странах мира (в Великобритании - Тичнер, во Франции - Дельбеф, в Италии - Брентано, в Соединенных Штатах Америки - Терстоун, Торгерсон, Троланд, Стивенс, Грин, в Швеции - Экман, Эйслер и др.). В первой половине XX столетия стали оформляться самостоятельные психофизические школы и направления. Подробнее об этом будет рассказано в первой главе нашей книги, где дается экскурс в историю психофизики и анализируется ее современное состояние. Здесь хотелось бы только отметить особое положение психофизики в

России. До начала 20-х годов психофизические исследования проводились (хотя и в незначительных по сравнению с западноевропейскими масштабах) в Москве, в Психологическом институте, возглавляемом Г.И. Челпановым. Новое же поколение советских психологов, вышедшее на арену в конце 20-х, вооруженное идеями Сеченова и Павлова, отвергло психофизику как лженауку по той причине, что философские построения Фехнера носили ярко выраженный субъективно-идеалистический характер. Отдельные советские ученые (П.П.Лазарев, С.В.Кравков, П.О.Макаров, С.Н.Гольдбурт и другие), занимаясь, по существу, психофизическими проблемами, маскировали их под разными "вывесками" - биофизики, физиологии анализаторов и т.п. И только в 1972 году, когда в Москве открылся Институт психологии АН СССР, психофизика в нашей стране была легализована, она приобрела статус официальной науки, равноправной с другими психологическими дисциплинами. В этой связи хотелось бы сказать несколько слов о месте психофизики в ряду других научных направлений. На сегодняшний день существует прочный триумвират наук, занимающихся проблемой отражения человеком внешнего мира. Психофизика, сенсорная физиология и психология чувственного познания - вот три "кита", на которых зиждется наше знание о механизмах и закономерностях сенсорного отражения. Используя разные подходы, методы исследования, концептуальный и понятийный аппарат, эти научные дисциплины, каждая по-своему, приближают нас к пониманию способности человека воспринимать информацию о событиях, явлениях, изменениях, происходящих в окружающем мире. В конечном счете психофизика, наряду с другими науками, должна привести нас к осмыслению места и роли Человека во Вселенной. Именно эту мысль проповедовал в свое время основатель психофизики Г.Т. Фехнер.

Раздел I

ОСНОВЫ ОБЩЕЙ ПСИХОФИЗИКИ

1. КРАТКИЙ ОЧЕРК ИСТОРИИ ПСИХОФИЗИКИ

1.1. ДОФЕХНЕРОВСКИЙ ПЕРИОД В ИСТОРИИ ПСИХОФИЗИКИ

Как отмечалось ранее, родоначальником психофизики как науки по праву считают известного немецкого физика и философа Г.Т. Фехнера. Тем не менее истоки психофизики уходят своими корнями гораздо глубже - по крайней мере в 1-ю половину XVIII столетия. В сущности, первая психофизическая модель субъективного восприятия цвета была предложена И. Ньютоном на основании его опытов по смешению цветов (см. 4.3). В начале XVIII века впервые в истории психологии начал дискутироваться вопрос о количественной связи между величиной раздражителя и ощущением, вызываемым данным раздражителем. Так, еще в 1743 году И.Крюгер предположил, что между силой раздражителя и величиной ощущения, вызываемого этим раздражителем, должна существовать закономерная связь (по Крюгеру, эта связь должна быть линейной, т.е. ощущение изменяется прямо пропорционально силе раздражителя). На два-три десятилетия раньше Крюгера проблема психофизического соответствия дискутировалась Крамером и Бернулли. В данном случае речь шла не о простой линейной зависимости, а о более сложных функциях типа степенной или логарифмической. Надо сказать, что в тот период проблема взаимосвязи между физическим и психическим так и не была решена.

Важную страницу в историю психофизики вписал французский физик М.Бугер в конце XVIII века. Он исследовал способность человека различать близкие между собой уровни освещенности. Оборудование, используемое Бугером в его экспериментах, вполне соответствовало тому времени - это стол с измерительной линейкой, на котором размещались две свечи, и экран, освещаемый этими свечами. Передвигая каждую из свечей на разное расстояние относительно экрана, Бугер пытался измерить то, что мы сейчас называ-

ем разностным (дифференциальным) порогом восприятия освещенности. Бугер пришел к выводу, что величина едва заметного различия (е.з.р.) между двумя освещенностями непостоянна - она возрастает пропорционально исходной освещенности: $\Delta L = k \cdot L$. Другими словами, отношение е.з.р. (ΔL) к исходному уровню освещенности есть величина постоянная: $\Delta L/L = const$. Аналогичные исследования для стимулов других сенсорных модальностей были проведены в середине прошлого столетия Э.Вебером. Так, в одном из своих опытов Вебер предлагал испытуемым определять разницу между тяжестью двух грузов, поднимаемых одновременно. Было установлено, в частности, что если в качестве исходного служил груз массой в 100 г, то испытуемый воспринимал едва заметное приращение тяжести при добавлении груза в 3 грамма. Если вес исходного груза увеличивался в 2, 3, 5... раз, то и величина разностного порога $\Delta P = P_1 - P_2$ повышалась в той же пропорции. Для веса в 200 г величина разностного порога составляла 6 г, для 300 г - 9 г и т.д. Нетрудно заметить, что и в этом случае соблюдается правило $\Delta P/P = const$.

Вышеуказанное отношение, выраженное в более общем виде - $\Delta S/S = const$ (S - величина раздражителя безотносительно к его сенсорной модальности) позднее стали называть правилом Вебера (или Бугера - Вебера). Как будет показано дальше, эта закономерность сыграла немаловажную роль в формулировке Фехнером его "основного психофизического закона".

1.2. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПСИХОФИЗИКИ КАК САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ НАУКИ. КОНЦЕПЦИЯ ФЕХНЕРА И "ОСНОВНОЙ ПСИХОФИЗИЧЕСКИЙ ЗАКОН"

Несмотря на то, что возникновение психофизики как науки обычно датируют 1860 годом (год выхода в свет книги Г.Фехнера "Элементы психофизики"), некоторые авторы называют более раннюю дату - 22 октября 1850 года. Именно в этот день Фехнеру пришла в голову мысль о законе количественной связи между физическими и психическими величинами. Надо отметить, что Фехнер ничуть не сомневался в возможности количественного измерения субъективных процессов. По его мнению, не только элементарные психические процессы (в частности ощущения), но и процессы более высокого порядка: "... живость воспоминаний, образы фантазии, интенсивность отдельных мыслей и т.д." могут быть выражены количест-

венно. Что же касается измерения ощущений, то рассуждения Фехнера в основном сводились к следующему:

1. Признавая справедливость правила Бугера - Вебера $\Delta S/S = \text{const}$, можно получить элементарную единицу измерения ощущений. Другими словами, величина дифференциального порога, которая является величиной постоянной и не зависит от абсолютного значения раздражителя, есть не что иное, как элементарный "квант" ощущения, и он может быть использован как единица измерения субъективных величин. Фехнер предложил следующую формулу: $\Delta S/S = \Delta R$, где ΔR - величина едва заметного ощущения. Надо было иметь известную смелость, чтобы математически приравнять отношение двух физических величин к субъективной (психической) величине. Справедливости ради необходимо отметить, что величина $\Delta S/S$ не имеет размерности и не может быть выражена в каких-либо физических единицах.

2. Принимая, что величины ΔS и ΔR являются бесконечно малыми (а это - наиболее уязвимый пункт фехнеровской концепции), можно записать психофизическое отношение в виде дифференциального уравнения следующего вида: $dS/S = dR$.

3. Интегрируя выражение $dS/S = dR$, можно вывести закон взаимосвязи между величиной R (ощущение) и S (сила раздражителя):

$$R = k \cdot \ln S + C, \text{ или } R = k' \cdot \lg S + C'.$$

Выведенный путем чисто математических рассуждений логарифмический закон (величина ощущения пропорциональна логарифму силы раздражения) Фехнер возвел в ранг "основного психофизического закона". В 1877 году в своем "Послесловии" к "Элементам психофизики" Фехнер писал: "Вавилонская башня в свое время не была построена, так как рабочие не могли договориться, как ее строить. Мое психофизическое сооружение (имеется в виду основной психофизический закон) никогда не будет разрушен, так как ученые никогда не договорятся, как его разрушать".

Насколько бы ни было амбициозным такое утверждение, надо отдать должное прозорливости Фехнера. Несмотря на многочисленные и продолжительные нападки со стороны противников Фехнера, логарифмический закон доказал свою жизнеспособность не только в психофизике, но и в нейрофизиологии, сенсорной физиологии и т.д. Было, в частности, показано, что физическая шкала интенсивности раздражителя на уровне рецепторов действительно претерпевает логарифмическое преобразование.

Волей судьбы логарифмический закон Фехнера вошел практически во все учебники и пособия по психологии и сенсорной физиологии. В то же время возражения против этого закона и альтернативные варианты психофизической зависимости, выдвигаемые со-

временниками Фехнера и последующими поколениями психофизиков, до недавнего времени оставались мало известными. В чем состоит сущность этих возражений и пересмотра логарифмического закона - пойдет речь в следующих разделах.

1.3. РАЗВИТИЕ ПСИХОФИЗИКИ В КОНЦЕ XIX - НАЧАЛЕ XX СТОЛЕТИЙ

Появление в 1860 году "Элементов психофизики" Фехнера совершило поистине революцию в психологии. Крупнейшие психологи второй половины XIX века размежевались на два лагеря. Одни из них правильно поняли и оценили сущность концепции Фехнера о возможности количественного подхода к описанию психических явлений и процессов и форсировали свои усилия именно в этом направлении. Крупнейшая фигура того времени - Вильгельм Вундт - стал основателем первой в мире лаборатории экспериментальной психологии. В этой лаборатории проводились исследования времени двигательной реакции, предпринимались попытки "расчленить" психику на отдельные элементарные психические акты, зарегистрировать, измерить, рассчитать их и уже после этого сконструировать целостную картину психической деятельности. Другие (ярким примером может служить известный американский психолог Уильям Джеймс) встретили в штыки саму идею о возможности количественного подхода в психологии. Так, Джеймс писал: "... ощущения как таковые вообще не имеют величины... Наше ощущение розового цвета наверняка не является "частью" ощущения красного... Одно ощущение не может быть суммой или произведением других. Если бы это было возможно, мы могли бы вычитать одно из другого и ощущать "остаток". Каждое ощущение представляет собой неделимую единицу."

Некоторые ученые заняли компромиссную позицию в данном вопросе. Например, Ж.Дельбеф считал, что хотя ощущения сами по себе не могут быть измерены, однако субъект способен измерять разницу между ними.

И среди сторонников, и среди противников Фехнера нашлись такие, которые попытались разрушить "вавилонскую башню". При этом "подкоп" под психофизическое сооружение делался с разных сторон. Одни утверждали, что неправомерно принимать за основу правило Бугера - Вебера, поскольку оно справедливо только в области средних значений силы раздражителя, а при низких и высоких интенсивностях нарушается. Другие (а их было большинство) указывали на неправомерность дифференцирования величин ΔS и ΔR , поскольку они не являются бесконечно малыми (о том, что это на

самом деле так, мы поговорим в следующих разделах). Наконец, третьи считали, что ΔR (субъективная величина едва заметного различия) не является постоянной. Джеймс, в частности, писал: "Едва заметное ощущение приращения тяжести воспринимается сильнее при добавлении нескольких фунтов к стофунтовому весу, нежели при добавлении нескольких унций к весу в один фунт. Фехнер игнорировал этот факт".

В качестве альтернативы закона Фехнера Ф.Брентано предложил уравнение следующего вида:

$$\Delta R/R = k \cdot (\Delta S/S).$$

Другими словами, он предположил, что правило Бутера - Вебера справедливо не только для физических параметров стимула ($\Delta S = kS$), но и для ощущений ($\Delta R = k'R$). Дифференцирование этого уравнения дает следующее выражение:

$$dR/R = k'/k \cdot (dS/S),$$

а интегрирование его приводит к двойной логарифмической (или степенной) зависимости типа:

$$\ln R = (k'/k) \cdot \ln S + C, \text{ или } R = k'' \cdot S^{k'/k}.$$

Экспериментальные подтверждения такой формы зависимости были получены в конце прошлого века П.Брегоном, И.Меркелем и другими исследователями.

Помимо двух вышеприведенных трактовок основного психофизического закона (логарифмической и степенной форм зависимости), были предложены и другие его модификации - экспоненциальная (А. Пюттер), тангенциальная (Э. Зиннер), арктангенциальная (Г. Бенеш), фи-гамма-функция (Р. Хьюстон) и т.д.

В конце XIX - начале XX столетий психологами был разработан ряд методов измерения величины ощущений, не связанных непосредственно с определением дифференциальных порогов. Это - методы равноделения (Плато), группировки (Титченер), оценки, установки, кросс-модального подбора (Стивенс) и другие. Более подробно об этих методах будет сказано в разделе 3.2.

Так или иначе, в XX столетии арсенал психофизических методов существенно пополнился. Это, в свою очередь, привело к лучшему пониманию психофизических закономерностей и формулировке новых теорий, концепций и подходов к решению психофизической проблемы.

1.4. "НОВАЯ ПСИХОФИЗИКА" С.С.СТИВЕНСА: ПОДХОДЫ, МЕТОДЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКТЫ

В 1960 году психологи всего мира отмечали столетие выхода в свет книги Фехнера "Элементы психофизики". Руководитель лабо-

ратории психофизики Гарвардского университета С.С.Стивенс выступил с речью по случаю этого юбилея. Название его доклада было явно претенциозным - "Воздадим честь Фехнеру и пересмотрим его закон". Стивенс объявил основной психофизический закон Фехнера "укоренившимся недоразумением" и предложил в качестве его альтернативы степенную функцию типа

$$R = k \cdot S^n,$$

т.е. "величина ощущения пропорциональна силе раздражителя, возведенной в некоторую степень". По Стивенсу, экспонента n в уравнении основного психофизического закона зависит только от модальности раздражителя и может принимать значения от 0,33 (для восприятия яркости света) до 3,5 (для болевого ощущения при электрокожном раздражении). Величины показателей степени для стимулов других сенсорных модальностей укладываются в диапазоне между этими крайними значениями.

Нетрудно понять, что степенной закон Стивенса возник не на пустом месте. Аналогичные взгляды высказывали еще Брентано, Плато, Дельбеф и другие исследователи в конце прошлого века. Ради справедливости надо отметить, что закон Стивенса возник не как результат математических спекуляций, а как следствие многочисленных экспериментов по шкалированию стимулов различной сенсорной модальности (см. 3).

Логарифмическая и степенная функции - не одно и то же, хотя в некоторых случаях они могут быть достаточно близки между собой. Логарифмическая функция подразумевает, что если величина стимула меняется в геометрической прогрессии, то величина ощущения - в арифметической. Иначе говоря, равным отношениям интенсивностей соответствуют равные приращения (разницы) ощущений. Степенная же функция предполагает, что равные отношения между стимулами дают равные отношения между субъективными величинами. При этом показатель степени играет роль коэффициента пропорциональности между субъективной и физической шкалами в их логарифмическом выражении.

Если рассмотреть семейство степенных функций с разным показателем степени в простых линейных координатах (рис.1), то можно видеть, что они значительно различаются между собой. Для тех сенсорных модальностей, где $n < 1$ (яркость света, громкость звука, интенсивность вкусового или запахового ощущения и т.д.), кривые возрастают с насыщением и прирост субъективной величины R значительно отстает от прироста интенсивности раздражителя S . Это имеет немаловажное значение, если учесть, что человек воспринимает стимулы этих модальностей в достаточно широком физическом диапазоне (например, для интенсивности звука этот диапазон со-

ставляет около 6, а для яркости света - 8-9 логарифмических единиц). Степенное преобразование позволяет зрительной и слуховой системам работать в наиболее экономичном режиме, "сжимая" физические шкалы при их трансформации в шкалы ощущений, суждений, оценок.

Для других сенсорных модальностей (тяжесть груза, величина ускорения, собственное мышечное усилие) величина экспоненты функции немногим больше единицы ($n = 1,2 \div 1,4$), т.е. в этом случае прирост ощущения опережает прирост физических величин. По-видимому, это играет определенную защитную, охранительную роль, препятствуя чрезмерной перегрузке проприорецепторов. Еще более отчетливо это проявляется для болевого ощущения ($n = 3,5$), диапазон восприятия которого (от весьма незначительной до невыносимой боли) не превышает одной логарифмической единицы. Действительно, есть ли необходимость для организма воспринимать боль в широком физическом диапазоне, тогда как болевое ощущение само по себе сигнализирует о каком-то неблагополучии в организме? Таким образом, величина показателя степени функции Стивенса, по-видимому, играет важную роль в смысле адекватного соотношения друг с другом физических и психических (субъективных) величин.

Наконец, необходимо упомянуть о том, что некоторые сенсорные модальности (длительность воздействия, линейные размеры, удаленность) обнаруживают величину экспоненты, близкую к единице:

$$R = k \cdot S^1 = k \cdot S.$$

Это те характеристики сенсорной стимуляции, которые должны восприниматься наиболее адекватно, что называется "один к одному", без каких-либо искажений. Если бы пространственные и временные параметры сенсорного раздражителя претерпевали нелинейные искажения, наше поведение и деятельность вряд ли были бы адекватными и целесообразными.

С.Стивенс провозгласил свою психофизику "новой" - в противовес "классической" психофизике Фехнера. В основе новой психофизики лежат прямые методы оценки раздражителей (в отличие от "косвенных" методов исследования, основанных на измерении едва заметных различий, которые ведут свое начало от Бутера и Вебера). В то же время, противопоставляя свой степенной закон логарифмическому закону Фехнера, Стивенс не учел одного весьма важного обстоятельства. Как будет показано далее (см. 3), при использовании методов шкалирования (общепринятые методы исследования в "новой" психофизике) речь идет не столько об ощущении, вызываемом тем или иным раздражителем, а о суждениях, оценках,

ранжировании, категоризации стимулов и т.д., которые, кроме сенсорно-перцептивных процессов, вовлекают (в большей или меньшей степени) мыслительные, интеллектуальные операции субъекта.

Таким образом, противопоставление "новой" психофизики "классической", степенного закона логарифмическому вряд ли можно считать правомерным, поскольку они отражают разные стороны, разные механизмы работы сенсорных систем.

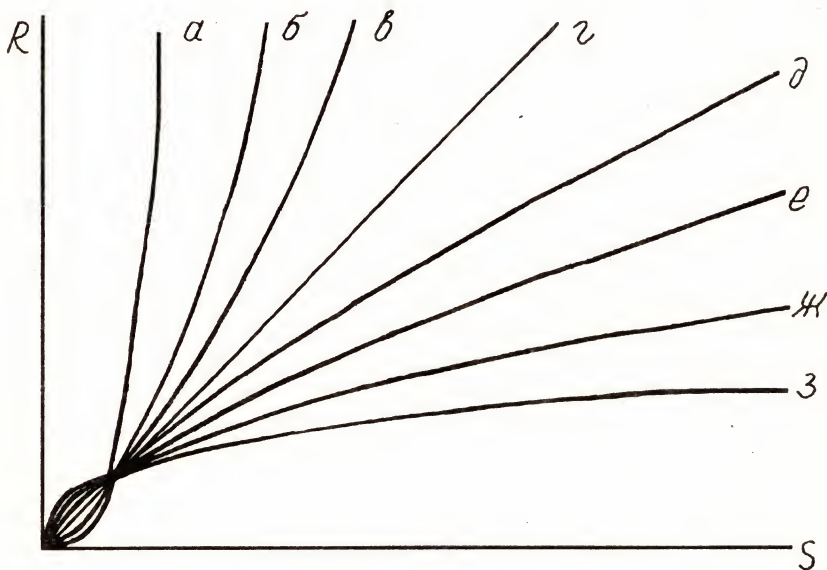


Рис.1. Семейство степенных функций Стивенса для стимулов разной сенсорной модальности: а - болевое ощущение ($n = 3,5$); б - ускорение ($n = 1,7$); в - тяжесть груза ($n = 1,3$); г - длина линий ($n = 1,0$); д - вкусовое ощущение ($n = 0,8$); е - громкость тонального звука ($n = 0,67$); ж - яркость точечного источника света ($n = 0,5$); з - яркость светового пятна ($n = 0,33$)

1.5. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПСИХОФИЗИКИ

Отыскание универсальной формулы основного психофизического закона - далеко не единственная задача, которая решалась исследователями за сто с лишним лет существования психофизики. Изучение закономерностей восприятия в околопороговой области, психофизических механизмов пространственной и временной суммации

в разных сенсорных системах, разработка разнообразных приемов и методов психофизического исследования, конструирование психофизических моделей, описывающих "субъективное пространство" для разных видов чувствительности, развитие и совершенствование концептуального и математического аппарата, - вот далеко не полный перечень проблем, решаемых в психофизических лабораториях всего мира - в Соединенных Штатах Америки, Швеции, Германии, Франции, России и других странах.

Международное психофизическое общество (ISP - International Society for Psychophysics) на сегодняшний день объединяет около 250 ученых из 23 стран мира. Ниже в таблице приводится расстановка сил на "психофизическом фронте" по разным странам. Конечно, уровень развития науки в каждой отдельно взятой стране определяется не только числом членов международных обществ, однако этот показатель, на наш взгляд, также является достаточно информативным.

**Число членов Международного психофизического общества
в разных странах мира (по данным на 1993 год)**

Соединенные Штаты Америки	70	Австралия	3
Германия	39	Нидерланды	2
Франция	31	Финляндия	2
Великобритания	21	Бразилия	2
Швеция	19	Новая Зеландия	2
Канада	14	Швейцария	1
Испания	11	Аргентина	1
Россия	11	Израиль	1
Япония	10	Венгрия	1
Италия	8	Польша	1
Бельгия	3	Словакия	1
		Болгария	1

Ежегодно члены ISP съезжаются на традиционный День Фехнера, который проводится в разных городах Европы и Соединенных Штатов Америки (Стокгольм, 1992; Пальма де Мальорка, 1993; Ванкувер, 1994 и т.д.). По материалам симпозиумов ежегодно издается "Proceedings", в котором публикуются новейшие результаты и достижения ученых-психофизиков.

В заключение исторического обзора развития и становления психофизики хотелось бы сказать следующее. В наш век голого прагматизма тенденции чисто прагматического плана не миновали и психофизику. В последние годы остро чувствуется отход от решения базовых, фундаментальных проблем и внедрение психофизических идей в прикладные области психологии (психоакустика, инже-

нерная, возрастная, клиническая психология и др.). Насколько перспективны такие тенденции, сказать трудно, но они существуют, и с этим приходится считаться. С одной стороны, весьма отрадно, что психофизика, возникшая как чисто теоретическая, мировоззренческая дисциплина, повернулась лицом к синоминутным, злободневным нуждам человечества. С другой стороны, теоретические изыскания психофизики, пути решения глобальной проблемы - проблемы познания человеком внешнего мира - не должны оставаться в тени, так как ценность их для современной науки огромна, она не может сравниться с синоминутными, чисто прагматическими проблемами. Хотелось бы верить, что фундаментальная психофизика отнюдь не канула в Лету.

2. ПСИХОФИЗИКА-1: ПРОБЛЕМА ПОРОГОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

2.1. КЛАССИЧЕСКОЕ И СОВРЕМЕННОЕ ПОНЯТИЕ ПОРОГА: ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ

2.1.1. Понятие порога в классической психофизике

Понятие порога было введено немецким философом И.Ф.Гербартом в начале XIX века. Герbart определял порог как границу между сферой сознания и сферой бессознательного. Г.Т.Фехнер конкретизировал это понятие следующим образом: *абсолютный порог чувствительности* есть физическая величина раздражителя, соответствующая границе между стимулами, вызывающими и не вызывающими субъективное ощущение. Другими словами, если величина сенсорного раздражителя ниже пороговой, то он ни при каких условиях не будет вызывать ощущения, если же она выше таковой, то в любом случае стимул будет вызывать у человека субъективное ощущение (рис.2, а). Таким образом, порог рассматривается как нижняя граница чувствительности, как барьер, который должен быть преодолен для того, чтобы возникло ощущение.

Разностный (дифференциальный) порог, по Фехнеру, это та минимальная разница между раздражителями, выше которой субъект замечает различие между ними, а ниже которой эти раздражители кажутся ему одинаковыми (рис.2, б). Сам Фехнер формулировал пороговый принцип следующим образом: "Раздражение или различие в раздражениях может возрасти до известных пределов, не вызы-

вая ощущения; но, начиная с определенной границы, оно начинает ощущаться и его возрастание тоже”.

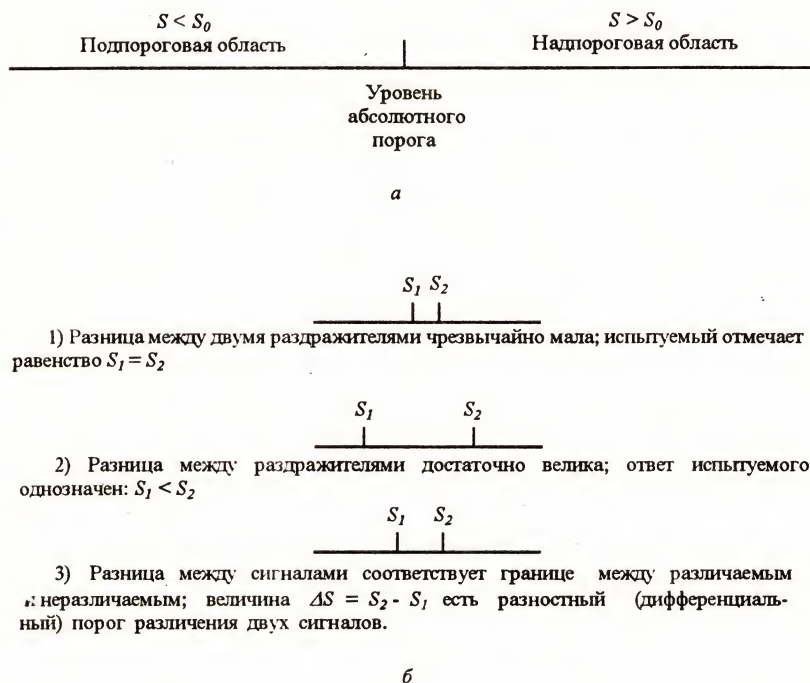


Рис.2. Трактовка порога в классической психофизике: а - пороговая модель обнаружения сигнала (абсолютный порог как граница между ощущаемым и неощущаемым); б - пороговая модель различения сигналов (разностный порог как граница между различением и неразличением двух сигналов)

Классическая концепция порога, сформулированная Фехнером и его последователями, была подвергнута критике уже в самом начале ее существования. Одна из главных причин этого - экспериментально установленный факт, что даже у одного и того же индивида порог не является строго постоянной величиной. В опыте экспериментатору всегда приходится иметь дело с разбросом значений измеряемой пороговой величины. По этому поводу С.Стивенс писал следующее: "Как правило, порог не является инвариантным во времени, скорее о нем можно сказать, что в тех или иных пределах он

непрерывно меняется и поэтому мы вынуждены как бы схватывать его "на лету"... То, что фиксируется как порог, есть, таким образом, произвольная точка внутри области вариативности".

Факт изменчивости пороговых величин интерпретировался по-разному. Если Фехнер и его последователи признавали факт флуктуации порога во времени и разрабатывали достаточно сложные статистические приемы его вычисления, то их оппоненты делали вывод о неправомерности самого понятия порога. В качестве альтернативы пороговой концепции многие исследователи (Мюллер, Дельбеф, Ястров и др.) предложили концепцию непрерывности сенсорного ряда. Согласно последней ощущение не является дискретным, а представляет собой непрерывный континуум. По мнению Ястрова, ощущение является непрерывной функцией, зависящей от двух переменных - интенсивности раздражителя и степени "предрасположенности" к восприятию раздражителя (т.е. состояния данной сенсорной системы в данный момент времени). По выражению Ястрова, степень предрасположенности к восприятию зависит "от многочисленных небольших колебаний состояния, которые всегда влияют на психический процесс", т.е. от случайного сочетания множества трудно учитываемых факторов (степень утомления, концентрация внимания, понимание инструкции, уровень мотивации (интереса) к данному эксперименту и т.д.).

Согласно концепции непрерывности сенсорного ряда влияние интенсивности раздражителя приводит к тому, что зависимость появления ощущения от силы раздражителя будет иметь вид возрастающей функции, а влияние благоприятных и неблагоприятных факторов скажется в том, какой конкретно вид будет иметь эта функция. Так, если баланс случайных факторов имеет вид нормального распределения (рис.3, а), то зависимость между вероятностью появления ощущения и интенсивностью раздражителя будет изображаться кумулятивной психометрической кривой (рис.3, б). Концепция непрерывности отрицает значение порога в том смысле, что он представляет собой фиксированную точку на физической оси. При большом числе действующих факторов положение этой точки будет постоянно варьировать внутри некоторой пороговой области и подчиняться нормальному распределению. Таким образом, абсолютный порог есть не статическая, а динамическая величина, которая может быть вычислена лишь в терминах вероятностной теории. По сути дела, сторонники концепции непрерывности признают порог лишь как операциональное понятие (так, на вышеуказанной кривой (рис.3, б) порог соответствует точке $P = 0,5$, т.е. равной вероятности того, что сигнал будет или не будет обнаружен). То же самое относится и к разностному порогу, который

может интерпретироваться как точка 50%-го различения или неразличения двух сигналов.

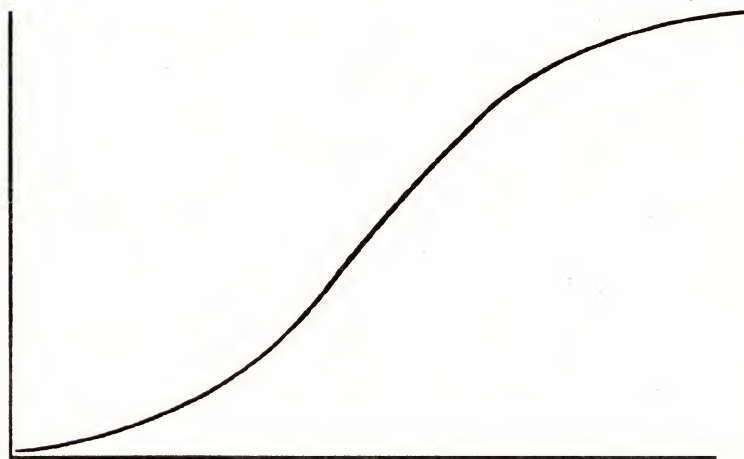
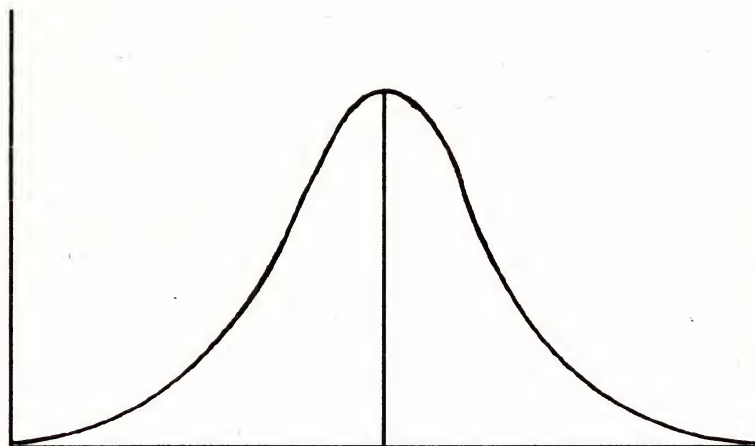


Рис.3. Распределение мгновенных значений порога (а) и соответствующая такому распределению психометрическая кривая (б)

Одной из достаточно плодотворных попыток примирения двух позиций - дискретности и непрерывности сенсорного ряда - является так называемая нейроквантовая теория, разработанная в 20 - 40-е годы Борингом, Троландом, Стивенсом и другими исследователями. Суть теории состоит в том, что функциональной единицей нервной (в частности сенсорной) системы является нервный квант (NQ). Каждый отдельный NQ срабатывает по закону "все или ничего", как только достигнут его порог. Поскольку таких квантов достаточно много, то психометрические кривые, как правило, имеют S-образный вид и не обнаруживают выраженных точек "перелома".

На существование нервного кванта указывает, в частности, то, что у некоторых испытуемых при определенных условиях эксперимента наблюдаются линейные психометрические функции. Они были обнаружены еще в 40-х годах Стивенсом, Морганом и Фолькманом. В этом случае вероятность обнаружения (различения) сигнала в пороговой области имеет не S-образный, а линейный вид, причем ширина пороговой области может быть определена с достаточно большой точностью.

Нейрофизиологическим аналогом NQ может являться величина активности одиночного рецептора или одиночного нервного волокна (возможно, это - один-единственный нервный импульс, который несет "квант" сенсорной информации).

Тот факт, что линейные психометрические функции наблюдаются в эксперименте далеко не всегда, может быть объяснен наличием посторонних факторов (например, изменением функционального состояния организма в процессе опыта и т.д.).

Ни концепция дискретности, ни концепция непрерывности сенсорного ряда не могут объяснить обнаруженный психофизиками феномен ложной тревоги (ФЛТ). Феномен заключается в том, что наблюдатель (испытуемый) обнаруживает сигнал (раздражитель) в пустой пробе, т.е. тогда, когда он фактически не предъявляется. Делались попытки объяснить этот феномен влиянием каких-то внесенсорных факторов (попытками угадывания или психологической установкой испытуемых на восприятие сигнала и т.п.). В практическом плане случаи ФЛТ расценивались как артефакты и исключались из статистической обработки.

Свое убедительное объяснение ФЛТ нашел лишь в современной психофизике, причем эта задача была успешно решена как сторонниками дискретности, так и сторонниками непрерывности сенсорного ряда.

2.1.2. Пути решения пороговой проблемы в современной психофизике

В 50-е годы пороговая проблема стала решаться несколькими различными путями. Это стало возможным благодаря появлению и развитию новых теорий и совершенствованию математического аппарата, используемого в психофизических исследованиях. В данном разделе мы более подробно рассмотрим некоторые из современных теорий и концепций порога.

Высокопороговая теория Блэквелла

Теория основывается на том, что порог есть фиксированная критическая точка на сенсорной оси. Стимул, превышающий пороговое значение, всегда вызывает ощущение; подпороговый стимул не может вызвать ощущение ни при каких обстоятельствах. Другими словами, понятие порога у Блэквелла не отличается от классического. Феномен ложной тревоги Блэквелл расценивает как явление не-сенсорной природы, связанное с психологической установкой наблюдателя (угадывание, стремление показать более высокий результат и т.д.).

По Блэквеллу, вероятность правильного положительного ответа (вероятность обнаружения сигнала $P_{об}$) складывается из двух составляющих: а) вероятности истинного обнаружения (P_u) надпорогового сигнала и б) вероятности случайного угадывания (P_{y2}), когда ответ испытуемого, данный наугад, случайно совпал с предъявлением нижепорогового стимула:

$$P_{об} = P_u + P_{y2}.$$

Если P_u - вероятность того, что предъявленный сигнал выше порогового значения, то вероятность того, что стимул окажется ниже порога, равна $1 - P_u$. Вероятность положительного ответа при отсутствии стимула равна $P_{лм}$. Совместная вероятность этих двух независимых событий (ложная тревога при подпороговом значении сигнала) равна их произведению: $P_{лм}(1 - P_u)$. Следовательно, вероятность угадывания равна

$$P_{y2} = P_{лм}(1 - P_u).$$

Отсюда:

$$P_{об} = P_u + P_{лм}(1 - P_u).$$

Произведя некоторые алгебраические преобразования, получаем значение истинного обнаружения:

$$P_u = (P_{об} - P_{лм}) / (1 - P_{лм}).$$

Эта формула получила наименование поправки на случайный успех.

Теория обнаружения сигнала

В основе теории обнаружения сигнала (ТОС) лежит положение о том, что сенсорное впечатление (ощущение) складывается из эффекта действия стимула и собственного "шума" сенсорной системы (рис.4).

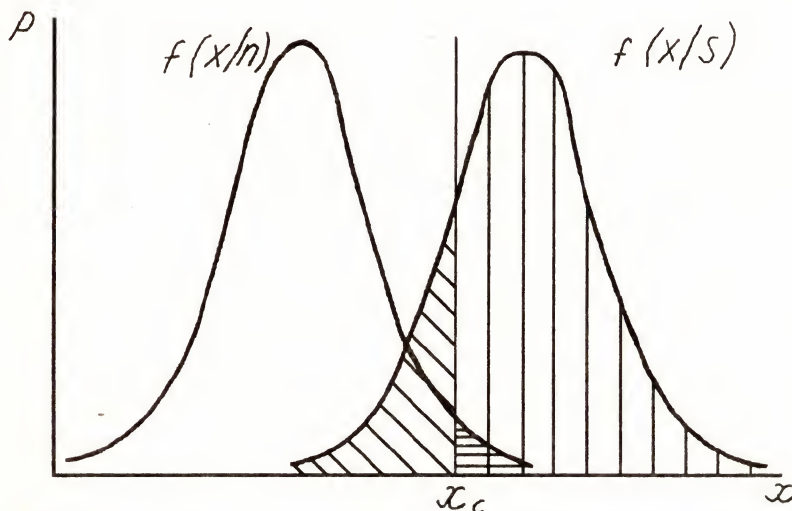


Рис.4. Модель, иллюстрирующая выделение сигнала из сенсорного шума, предлагаемая ТОС: по оси абсцисс - величина сенсорного эффекта; по оси ординат - вероятность, с которой этот эффект достигает каждой величины

$f(x/n)$ отражает появление сенсорного эффекта " x " в результате события " n " (noise - шум). $f(x/s)$ описывает появление сенсорного эффекта в результате события " s " (signal). На достаточно широком участке, соответствующем области перекрытия кривых, сенсорный эффект, имеющий одну и ту же величину, может возникнуть как в результате появления сигнала, так и в результате действия одного шума. В этой ситуации перед наблюдателем стоит задача - на основании возникающего сенсорного эффекта, который меняется только по величине, установить, элементом какого распределения является этот эффект - смеси сигнала с шумом или одного фонового шума.

В данном случае испытуемый устанавливает некоторый критерий (на рис.4 - x_c), т.е. некоторое критическое значение сенсорного эффекта. Если наблюдаемый эффект оказывается выше критерия, испытуемый решает, что сигнал был, если ниже критерия - что был только шум.

Таким образом, точка критерия x_c делит всю область наблюдаемых эффектов на два подмножества. Одно подмножество (наблюдение в нем приводит к решению, что сигнал был) находится справа от x_c ; другое (наблюдение в нем приводит к решению, что сигнала нет) - слева от x_c .

Система реакций испытуемого включает в себя четыре возможных исхода:

1) Y/s - сигнал был, ответ "да". $P(Y/s)$ есть "попадание" (обнаружение сигнала), ему соответствует площадь под кривой $f(x/s)$ справа от x_c (вертикальная штриховка).

2) N/s - сигнал был, ответ "нет". $P(N/s)$ - пропуск, соответствует площади под кривой $f(x/s)$ слева от x_c .

3) Y/n - был только шум, испытуемый ответил, что был сигнал. $P(Y/n)$ - ложная тревога: площадь под кривой $f(x/n)$ справа от x_c (горизонтальная штриховка).

4) N/n - был шум, испытуемый ответил, что сигнала не было. $P(N/n)$ - "покой" (площадь под кривой $f(x/n)$ слева от x_c).

Вполне понятно, что эти исходы будут в значительной степени зависеть от взаимного расположения двух распределений и от положения критерия x_c на сенсорной оси. Так, для того чтобы избавиться от ложных тревог, необходимо максимально сместить x_c вправо. Однако при этом значительно увеличится число пропусков. Аналогично, для того, чтобы максимизировать число обнаружений, необходимо сместить x_c влево, следовательно, увеличится число ложных тревог.

Если для наблюдателя одинаково важны все 4 категории ответов (или ни в одной из них он специально не заинтересован, или, наконец, сигнал и шум с одинаковой вероятностью могут оказаться в любой пробе), то оптимальное значение критерия будет соответствовать точке пересечения кривых $f(x/s)$ и $f(x/n)$.

Теория обнаружения сигнала, по существу, отрицает понятие порога, основываясь на концепции непрерывности сенсорного ряда.

В качестве показателя возможности обнаружения сигнала в зависимости от параметров распределений $f(x/n)$ и $f(x/s)$ предлагается использовать величину d' , которая определяется следующим образом:

$$d' = (m_s - m_n)/\sigma,$$

где m_s есть $M\{s + n\}$ - математическое ожидание (вероятность) сенсорных эффектов, вызываемых действием смеси сигнала с шумом; m_n есть $M\{n\}$ - математическое ожидание эффектов, вызываемых шумом; σ - стандартное отклонение рассматриваемого распределения (в простейшем случае предполагается, что $\sigma_s = \sigma_n$).

Зависимость результатов, показываемых испытуемым, от вышеуказанных факторов (m_s , m_n , σ) получила название рабочей характеристики приемника (РХП). РХП - это зависимость вероятности попадания от вероятности появления ложных тревог: $P(Y/s) = f[P(Y/n)]$. Другие два исхода в РХП не фигурируют, поскольку могут быть выражены через вышеуказанные вероятности:

$$P(N/s) = 1 - P(Y/s) \text{ и } P(N/n) = 1 - P(Y/n).$$

ТОС и высокопороговая теория Блэквелла подразумевают различные формы кривых РХП (в первом случае криволинейные, во втором - прямолинейные, рис.5). Экспериментальная проверка справедливости той и другой теории дала больше доказательств в пользу ТОС, т.к. в большинстве случаев кривые РХП в самом деле не являются линейными. Тем не менее ряд исследователей получил данные в пользу высокопороговой теории. Таким образом, проблема непрерывности-дискретности сенсорного ряда с точки зрения вышеуказанных теорий на сегодняшний день остается открытой.

Теория двух состояний

Теория двух состояний (ТДС), разработанная Р.Д.Люсом в начале 60-х годов, является в некотором смысле компромиссной между теориями, признающими дискретность, и теориями, отстаивающими непрерывность сенсорного ряда. С одной стороны, ТДС признает существование порога, выше которого все сенсорные раздражители вызывают одно и то же состояние $D+$ (обнаружение сигнала, detection). Все раздражители, которые оказываются ниже порога, соответственно, дают состояние $D-$. Кроме того, Люс вводит допущение, что при отсутствии сигнала вероятность превышения порога не равна нулю. Отсюда следует, что в какой-то части пустых проб может возникнуть состояние $D+$. Таким образом, функции $f(x/s)$ и $f(x/n)$ будут иметь вид, как показано на рис.6. Люс принимает также, что ответ испытуемого определяется не только двумя возможными сенсорными состояниями. Предполагается, что существует еще и независимый от сенсорных процессов механизм угадывания, причем испытуемый может использовать этот механизм двояким образом. В одном случае он избирает стратегию риска, т.е. стремится обнаружить как можно больше сигналов. Естественно, что при этом растет и число ложных тревог. Другая стратегия - стратегия осторожности, когда испытуемый стремится минимизировать число ложных тревог. В любом из этих случаев возможны 4 исхода:

$$1) P(D+/s) = q_s; \quad 2) P(D-/s) = 1 - q_s; \quad 3) P(D+/n) = q_n; \quad 4) P(D-/n) = 1 - q_n.$$

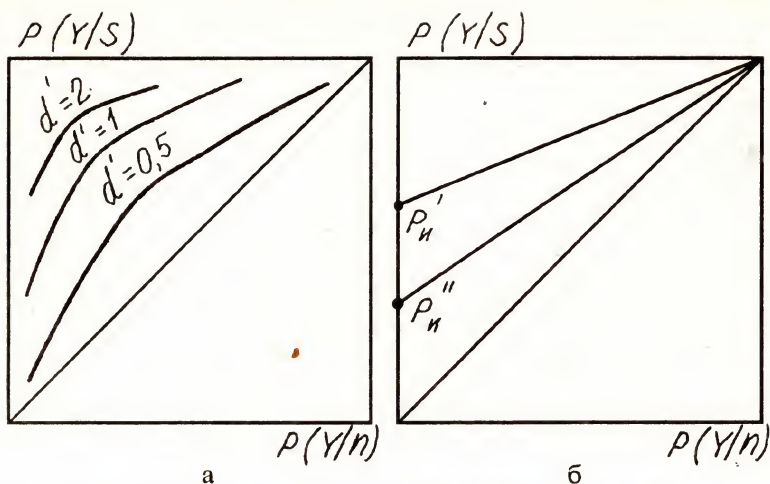


Рис. 5. Кривые РХП, предсказываемые теорией обнаружения сигнала (а) и высокопороговой теорией Блэквелла (б)

Кривые РХП в данном случае будут иметь вид ломаной линии (рис. 7,а), на которой положение "точки перелома" (q_+ , q_-) будет определяться стратегией испытуемого в данном конкретном эксперименте.

Одной из модификаций ТДС является "двухпороговая" модель, предложенная Д.М.Грином. Она предусматривает, кроме D^+ и D^- некоторую область неопределенности. В этом случае кривая РХП будет иметь вид функции с двумя точками перехода (рис.7,б), которая больше согласуется с РХП, предсказываемой теорией обнаружения сигнала.

Низкопороговая теория

Теория, предложенная Дж.Светсом, основана на том, что экспериментальные кривые РХП часто являются асимметричными. Согласно психофизической модели ТОС такая форма РХП может быть получена, если у распределений $f(x/s)$ и $f(x/n)$ окажутся разные дисперсии (рис.8).

Идея Светса о низком пороге состоит в том, что порог лежит ниже точки, соответствующей 50%-й вероятности обнаружения сигнала.

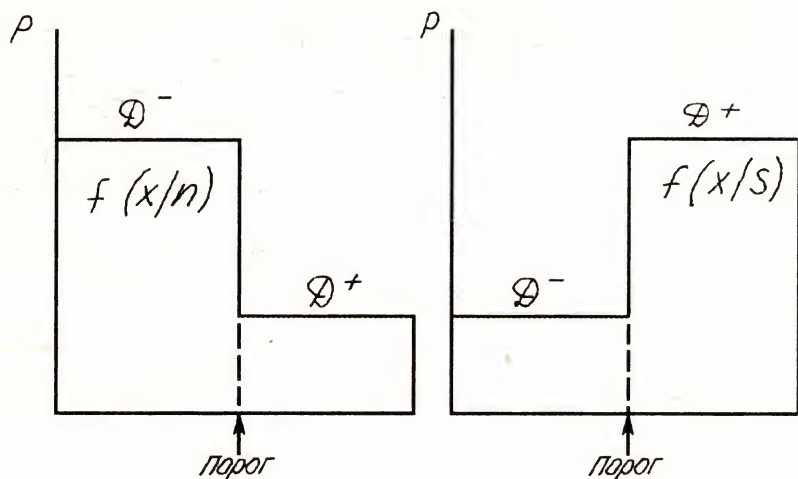


Рис.6. Функции $f(x/s)$ и $f(x/n)$ согласно теории двух состояний Люса

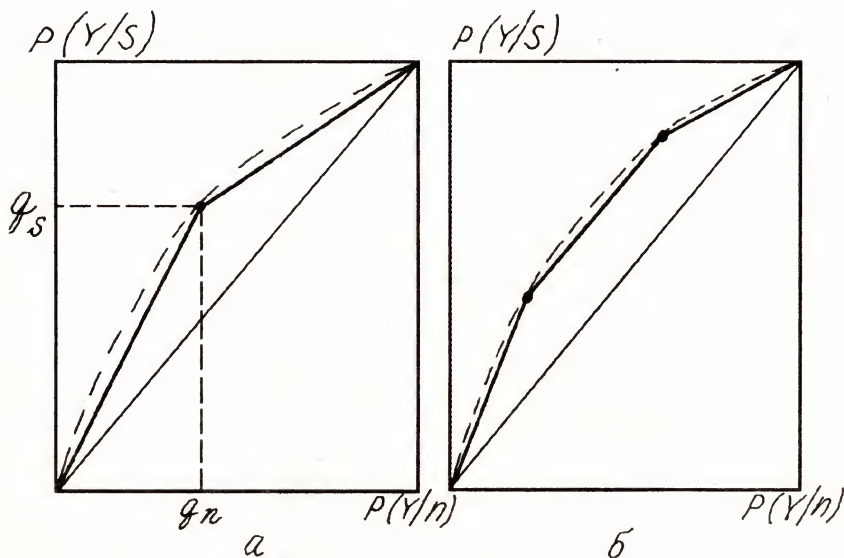


Рис.7. Форма кривых РХП, предсказываемая теорией двух состояний Люса (а) и "двухпороговой" моделью Грина (б)

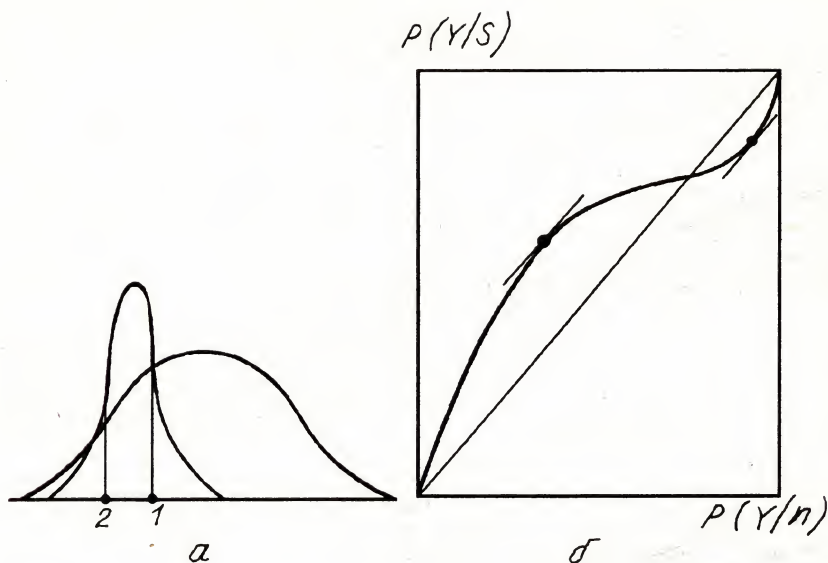


Рис.8. Форма РХП, предсказываемая теорией обнаружения сигнала для случая неравновариативности распределений $f(x/n)$ и $f(x/s)$: а - распределения $f(x/n)$ и $f(x/s)$ (в точках 1 и 2 РХП наклон кривой равен единице); б - кривая РХП, соответствующая этим распределениям

Кроме рассмотренных, существуют и другие модели и теории, претендующие на решение пороговой проблемы (в частности модель Аткинсона, стохастическая рекуррентная модель Ю.М.Забродина и др.), которые не получили столь широкого распространения в психофизике, как предыдущие, и поэтому рассматриваться не будут.

В заключение обсуждаемого вопроса можно констатировать следующее. Современное состояние проблемы не позволяет отдать предпочтение принципу дискретности или принципу непрерывности. Исследования последних десятилетий показали, что пороговая проблема имеет отношение не только к сенсорной чувствительности как таковой, но и к чисто психическим процессам и состояниям индивида. Другими словами, определяющим фактором в пороговых измерениях является не только величина сигнала и состояние рецепторных аппаратов, но и концентрация и устойчивость внимания испытуемого, его установка на восприятие, выбор оптимальной стратегии и критерия обнаружения сигнала и т.д.

2.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОГОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Для определения абсолютных и дифференциальных порогов чувствительности в психофизике используется 6 основных методов исследования: 1) метод минимальных изменений; 2) метод средней ошибки; 3) метод постоянных раздражителей; 4) метод "да - нет"; 5) метод оценки; 6) метод вынужденного выбора.

2.2.1. Метод минимальных изменений

Метод минимальных изменений (метод пределов, метод границ) является одним из наиболее простых (в плане экспериментальной процедуры и обработки полученных результатов) психофизических методов. В плане измерения *абсолютных порогов чувствительности* суть его заключается в следующем. Через определенные промежутки времени (как правило, после предупредительного сигнала иной модальности) испытуемому предъявляется сенсорный раздражитель, который с каждым "шагом" (предъявлением) весьма незначительно уменьшается (убывающая, или нисходящая, серия) или увеличивается (возрастающая, или восходящая, серия). Испытуемый должен обнаружить границу исчезновения (в первом случае) или появления сигнала (во втором). Ответы могут даваться либо в вербальной форме ("да - нет", "слышу - не слышу" и т.д.), либо нажатием на соответствующую кнопку. За пороговое значение принимается среднее значение интервала между ощущаемым и неощущаемым раздражителем (рис. 9).

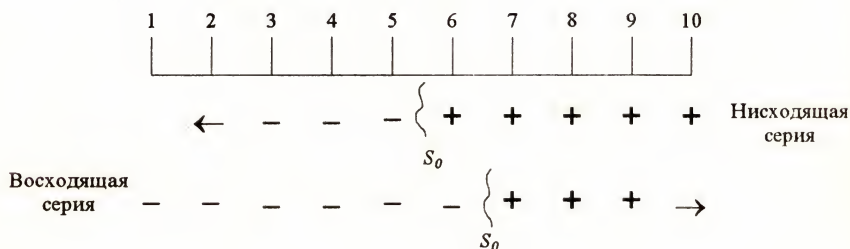


Рис. 9. Определение абсолютного порога методом минимальных изменений

Как правило, нисходящие и восходящие серии (убывание и возрастание сигнала) многократно чередуются, а значение порога соответствует среднему арифметическому значению нескольких серий:

$$S_{\text{пороговое}} = \Sigma S_0/n,$$

где n - число серий; S_0 - граница перехода от категории "ощущаю" к категории "не ощущаю", или наоборот.

В некоторых случаях (если позволяют возможности стимулирующей аппаратуры) раздражитель изменяется не дискретно, а непрерывно. Задача испытуемого в этом случае несколько изменяется: он должен дать ответ (нажать на кнопку) в тот момент, когда стимул, по его мнению, исчез (в нисходящей серии) или появился (в восходящей). При использовании этого варианта экспериментатор фиксирует пороговую точку в момент ответа испытуемого (вербального или инструментального).

При использовании метода минимальных изменений должен выполняться ряд требований:

1. При дискретном предъявлении сигналов ряды стимулов должны варьировать по числу "шагов", т.е. "точка отсчета" (первоначально предъявляемый сигнал) должна варьировать от серии к серии. Величина "шага" изменений раздражителя при этом должна оставаться постоянной. Такая постановка эксперимента препятствует выработке у испытуемого установки на то, что стимул должен исчезнуть (или появиться) на определенном по счету "шаге".

2. В опыте экспериментатор выбирает оптимальную величину "шага" между стимулами, а следовательно, количество "шагов" в каждой серии. И то и другое не должно быть большим: в первом случае определение порога будет недостаточно точным, во втором - увеличение числа "шагов" может привести к утомлению и снижению концентрации внимания испытуемого.

3. Ответы испытуемого даются, как правило, по двухкатегорийной системе. Иногда допускается использование промежуточной категории ("не уверен", "не знаю" и пр.). В этом случае за точку порога принимается среднее значение интервала при переходе от положительной (отрицательной) к нейтральной категории.

4. Как правило, желательными являются предварительные (тренировочные) опыты, в которых испытуемый осваивает методику эксперимента, а экспериментатор, в свою очередь, выбирает оптимальный режим предъявления сигналов, величину шагового интервала и т.д.

Важным при использовании метода минимальных изменений является то, что пороговые точки в нисходящей и восходящей сериях, как правило, не совпадают между собой. Если пороговое значение в нисходящей серии ниже, чем в восходящей, это свидетельствует о

тенденции привыкания; при обратном соотношении имеет место тенденция (стратегия) ожидания исчезновения или появления сигнала. Использование пар нисходящих и восходящих серий и, соответственно, усреднение значений в этих сериях в определенной мере нивелирует ошибки, связанные с привыканием к сигналу или ожиданием его.

Для исследования дифференциальных порогов (в отличие от измерения абсолютной чувствительности), метод минимальных изменений предполагает одновременную или последовательную подачу двух раздражителей, один из которых (в пределах одной серии) является постоянным и служит в качестве стандарта. Второй раздражитель (тестовый стимул) изменяется в порядке возрастания или убывания (дискретно или непрерывно). Как правило, первоначально предъявляемый тестовый стимул должен быть заметно больше (в нисходящей серии) или меньше стандарта (в восходящей). Задача испытуемого состоит в определении равенства или едва заметного различия между стандартным и варьирующим раздражителями. Используется трехкатегорийная система оценок "меньше стандарта", "больше стандарта", "равен стандарту". В данном случае определяются не две (как в случае измерения абсолютной чувствительности), а четыре пороговых точки: две верхних (точки перехода от категории "равно" к категории "больше" в восходящей серии и от категории "больше" к категории "равно" - в нисходящей) и две нижних точки (переход от категории "меньше" к категории "равно" в восходящей серии и от категории "равно" к категории "меньше" - в нисходящей (рис. 10).

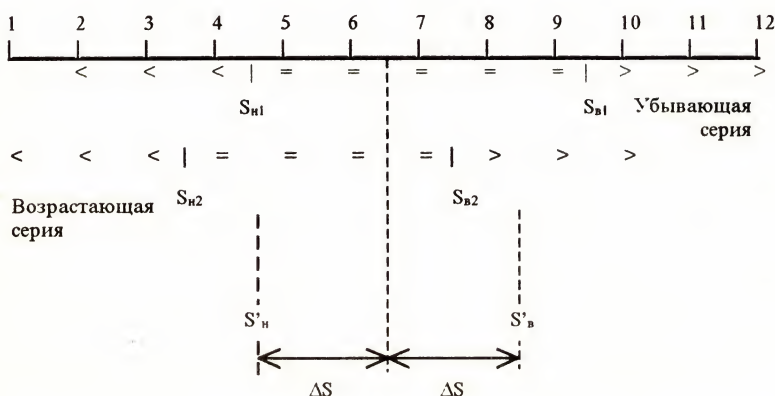


Рис. 10. Определение дифференциального порога методом минимальных изменений

Обработка результатов состоит в определении средних значений верхнего и нижнего порогов. Величина разностного порога определяется как половина диапазона между этими значениями:

$$\Delta S = (S_{\text{ср. верхн.}} - S_{\text{ср. нижн.}})/2.$$

Все требования, предъявляемые к методу минимальных изменений при измерении абсолютной чувствительности остаются в силе.

2.2.2. Метод постоянных раздражителей

Метод постоянных раздражителей имеет много общего с методом минимальных изменений. Существенным отличием от последнего является то, что стимулы предъявляются не в порядке их возрастания и убывания, а в случайной последовательности. При измерении абсолютного порога опыт состоит из нескольких серий, причем предъявляемые стимулы лежат в заведомо околороговой области. Испытуемый дает ответы по двухкатегорийной системе ("да" - "нет", "ощущаю" - "не ощущаю" и т.д.). Иногда допускается использование трехкатегорийной системы ("да", "нет", "не знаю").

Обработка данных эксперимента заключается в построении и анализе психометрической кривой, которая представляет собой вероятность отнесения данного стимула к категории "ощущаю". Вероятность вычисляется по достаточно простой формуле:

$$P(+) = N(+)/n,$$

где $N(+)$ - число "плюсовых" ответов ("да", "есть", "ощущаю"), а n - общее число ответов для каждого из предъявляемых сигналов: $n = N(+) + N(-)$ (для двухкатегорийной системы ответов) или $n = N(+) + N(0) + N(-)$ при использовании трех категорий.

В случае использования трехкатегорийной системы оценок, когда присутствуют "нейтральные" (нулевые) ответы $N(0)$, формула незначительно усложняется:

$$P(+) = [N(+) + N(0):2]/n.$$

Обычно психометрическая кривая имеет типичный S-образный вид. В том случае, когда она не является идеально гладкой, ее аппроксимируют кумулятивной кривой нормального распределения или методом наименьших квадратов. Пороговая точка определяется при экстраполяции на ось абсцисс значения психометрической кривой, соответствующей 50%-й вероятности ($P = 0,5$, рис. 11).

При исследовании дифференциальных порогов метод постоянных раздражителей включает в себя одновременное или последовательное (в зависимости от сенсорной модальности) предъявление стандартного и переменного стимулов, причем величина последнего варьирует случайным образом. Ответы испытуемого даются по трехкатегорийной шкале "больше - меньше - равно". Диапазон

варьирующих сигналов должен подбираться таким образом, чтобы его крайние значения субъективно были отличимы от стандарта с вероятностью около 1, а середина диапазона приблизительно соответствовала значению стандарта. Обработка результатов сводится к построению психометрической кривой (рис. 12), причем величина дифференциального порога может вычисляться двумя разными способами. Наиболее простой из них состоит в том, что по скорректированным значениям $P'(>) = [N(>) + N(=):2]/n$ строится психометрическая кривая. На оси ординат в данном случае отмечаются две точки: $P = 0,25$ (середина интервала перехода от категории "равно" к категории "меньше") и $P = 0,75$ (середина интервала перехода от категории "равно" к категории "больше"). Проекция точек пересечения с кривой, экстраполируемые на ось абсцисс, ограничивают интервал, равный удвоенному дифференциальному порогу. Таким образом, ΔS вычисляется как половина этого интервала (рис. 12, а).

Другой способ заключается в том, что на одном графике строятся три кривые - вероятности "больше стандарта", "меньше стандарта" и "равно стандарту". В этом случае вероятности не корректируются с учетом ответов "равно", т.е. вычисляются по формулам:

$$P(>) = N(>)/n, P(=) = N(=)/n \text{ и } P(<) = N(<)/n,$$

где n - общее число ответов. В этом случае величина дифференциального порога будет равна половине интервала между точками пересечения горизонтали $P = 0,5$ с кривыми $P(>)$ и $P(<)$ (рис. 12, б). Значения кривой $P(=)$ при использовании этого способа не учитываются.

2.2.3. Метод средней ошибки

Метод средней ошибки (метод подравнивания, метод воспроизведения), в отличие от других методов измерения *абсолютной чувствительности*, предусматривает активные манипуляции испытуемого с величиной сенсорного раздражителя. Задача испытуемого состоит в том, чтобы, изменяя величину сигнала, добиться его исчезновения (нисходящая серия) или появления (восходящая серия). Экспериментатор по показаниям прибора фиксирует физическое значение раздражителя, соответствующее субъективному исчезновению и появлению ощущений. Как правило, первые значения исчезающего и появляющегося сигналов, устанавливаемые испытуемым, довольно грубы, но с каждой новой пробой работа становится все более точной. Одна из возможных стратегий испытуемого при использовании метода средней ошибки, представлена на рис. 13.

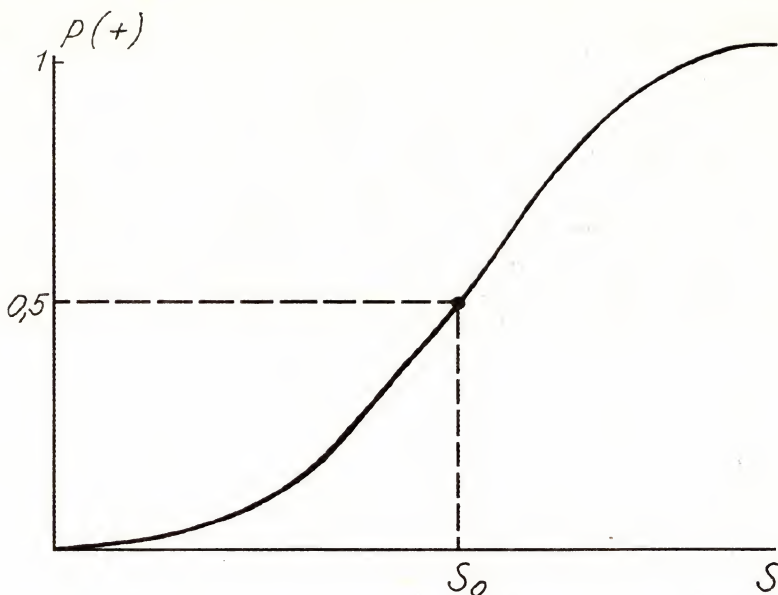


Рис. 11. Определение абсолютного порога методом постоянных раздражителей

Поскольку в разных пробах (сериях) пороговые точки могут не совпадать друг с другом, используется построение гистограмм (полигонов распределений) полученных значений с последующей их обработкой стандартными статистическими методами (определение моды, медианы, среднего значения, стандартного отклонения и т.д.). При этом можно проигнорировать начальные результаты, где размах вариаций довольно велик и взять для обработки результаты, даваемые во второй половине опыта. Другим вариантом является проведение сначала тренировочной, а затем - контрольной серии (при этом учитываются только результаты последней).

При несовпадении распределений устанавливаемых значений исчезновения и появления сигнала (как это чаще всего случается) прибегают к операции усреднения данных (так же как и при использовании метода минимальных изменений).

При исследовании *дифференциальных порогов* метод средней ошибки предусматривает наличие двух раздражителей - стандартного и переменного. Испытуемый, манипулируя с величиной переменного стимула, начальное значение которого может быть либо больше, либо меньше стандарта, подстраивает переменный сигнал

к стандартному так, чтобы: 1) оба стимула были субъективно равны; 2) тестовый стимул был едва заметно меньше стандарта; 3) тестовый стимул был едва заметно больше стандарта.

Как правило, проба начинается со значений тестового сигнала, заведомо больших или меньших стандартного стимула. Так же как и при измерении абсолютного порога, в процессе опыта испытуемый progressively сужает диапазон устанавливаемых сигналов и в конечном счете манипулирует только в околпороговой области.

Обработка результатов состоит в построении полигонов (гистограмм) распределения частот устанавливаемых испытуемым значений с последующим статистическим анализом¹.

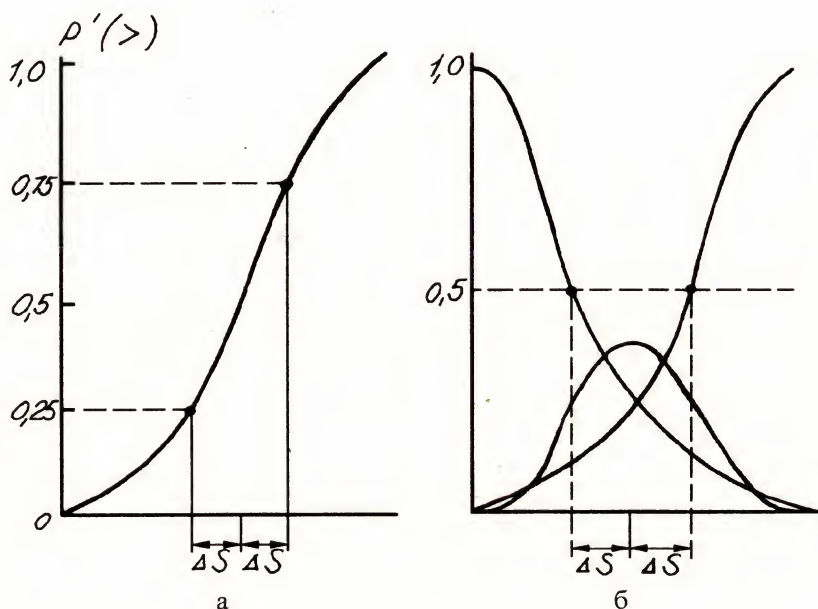


Рис. 12. Определение дифференциальных порогов методом постоянных раздражителей

¹ Подробнее см.: Бардин К.В. Проблема порогов чувствительности и психофизические методы. М., 1976.

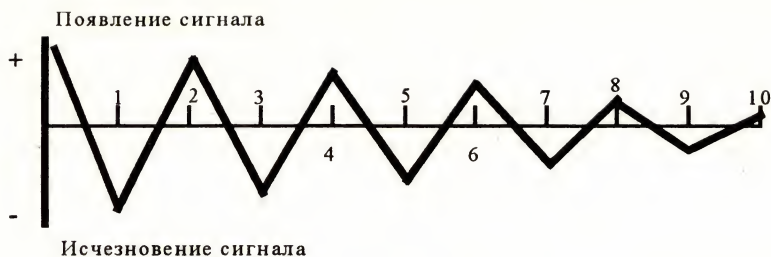


Рис. 13. Стратегия испытуемого при определении абсолютного порога методом средней ошибки.

2.2.4. Метод "да - нет"

Метод "да - нет", являющийся одним из методов современной психофизики, используется только для измерения абсолютных порогов чувствительности. Этот метод, в отличие от рассмотренных, предусматривает предъявление испытуемому как проб (серий), содержащих сигнал, так и проб, не содержащих его (пустые пробы, или пробы-ловушки). В связи с этим ответы испытуемого включают в себя не только обнаружение или необнаружение сигнала - вероятности $P(Y/s)$ и $P(N/s)$, но и случаи ложной тревоги ($P(Y/n)$), когда испытуемый "обнаруживает" сигнал в пустой пробе. По результатам опыта строятся кривые РХП (рабочая характеристика приемника) в координатах $P(Y/s) = f(P(Y/n))$. При этом показатель d' (см. раздел 2.1) определяется графически или с помощью таблиц нормального распределения.

2.2.5. Метод оценки

Метод оценки имеет много общего с методом "да - нет". Так же как и предыдущий, он используется для определения абсолютного порога и включает в себя "сигнальные" и "пустые" пробы. Отличие состоит в том, что оценка сигнала дается не по двухкатегорийной ("да - нет") шкале, а по шкале, включающей в себя большее число категорий (обычно 5-7). При этом оценочные категории могут быть как количественными, так и качественными (вербальное описание типа "стимул был", "скорее всего, был", "возможно, был" и т.д.). Для нетренированных испытуемых вербальное описание представляется более предпочтительным.

Обработка результатов опыта достаточно сложна, так как экспериментатору приходится определять вероятности $P(Y/s)$ и $P(Y/n)$ для каждой категории ответов. В целом же построение кривых РХП и вычисление показателей чувствительности мало отличается от такового при использовании метода "да - нет".

2.2.6. Метод вынужденного выбора

Метод вынужденного выбора, в отличие от метода "да - нет" и метода оценки, включает в себя пробы с несколькими интервалами наблюдения. Задача испытуемого состоит в том, чтобы назвать интервал, в котором присутствовал стимул. Обработка результатов, в целом, аналогична таковой в методе "да - нет". Метод также используется для изучения абсолютной чувствительности.

В заключение следует отметить, что три из шести вышеприведенных методов (метод "да - нет", метод оценки и метод вынужденного выбора) являются прерогативой современной психофизики и трактуются с точки зрения статистической теории обнаружения сигнала (см. 2.1).

2.3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОРОГОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

В теоретическом плане исследования абсолютных и дифференциальных порогов для стимулов разной модальности дали достаточно большую информацию для понимания основных закономерностей работы различных сенсорных систем. На сегодняшний день можно говорить о тесной стыковке двух научных дисциплин - психофизики и сенсорной физиологии. В большинстве случаев субъективные (вербальный отчет) и объективные (нейронная активность) показатели достаточно хорошо совпадают друг с другом. Изучение нейронных кодов (амплитуда рецепторного потенциала, частота нервных импульсов в афферентных волокнах, число импульсов в группах (пачках), генерируемых центральными нейронами и т.д.) позволило понять, как кодируется информация о физических параметрах раздражителя (интенсивность), как происходит ее переработка на разных "этажах" сенсорной системы и т.д.

Исследование абсолютного порога и его временной динамики позволяет оценить возможности (в том числе и предельные) различных анализаторов. Это имеет огромное практическое значение, особенно для тех видов деятельности, которые непосредственно связаны с сенсорно-перцептивными процессами (работа радистов, телеоператоров, гидроакустиков, дизайнеров, дегустаторов и др). Не-

сомненно, важное значение исследование порогов чувствительности имеет для профотбора и профориентации человека на соответствующие специальности.

Большое значение имеет исследование порогов чувствительности у лиц, чья профессия так или иначе связана с неординарными, часто экстремальными, ситуациями (летчики, космонавты, спасатели и др.). Часто встает вопрос о возможности тренировки некоторых видов чувствительности, ее повышения, а в некоторых случаях и снижения (например, снижение чувствительности вестибулярной системы у космонавтов).

Определенную роль играет измерение порогов чувствительности в возрастной (в частности детской) психологии и психофизиологии. Динамика изменения порогов с возрастом дает достаточно ценную информацию о развитии сенсорно-перцептивных процессов у детей.

Несомненно значение исследований порогов чувствительности для клиницистов. Некоторые методы служат непосредственно для постановки клинического диагноза (пробы Рине, Вебера, метод адаптометрии и др.). Исследование порогов может являться достаточно хорошим индикатором поражений той или иной сенсорной системы, а также восстановления ее функций в результате лечения.

3. ПСИХОФИЗИКА-2: СЕНСОРНЫЕ ШКАЛЫ

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ШКАЛАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Обычно шкалу (в широком смысле этого слова) определяют как изоморфное отображение эмпирической системы с отношениями в численную систему с отношениями. Другими словами, задача построения шкал состоит в упорядочении, ранжировании ряда объектов, событий, изменений и пр. по какому-либо признаку и присвоении им количественных (численных) значений в соответствии с определенными правилами. Однако на практике шкала не всегда представляет собой упорядоченный численный ряд, но может задаваться и некоторыми качественными обозначениями (категориями), как показано на схеме на стр. 36.

Таким образом, понятие *шкалирования* часто оказывается шире понятия *измерение*. Иногда оно подразумевает преобразование метрической шкалы какого-либо признака в систему понятий, суждений и умозаключений, которая должна быть определенным образом упорядочена.

Пример шкалы с качественными обозначениями:



Выделяют 4 типа измерительных шкал - номинальную, порядковую, интервальную шкалу и шкалу отношений.

Номинальная шкала (шкала наименований) основана на присвоении определенных обозначений (названий) тем или иным объектам, явлениям, свойствам и т.д. Номинальная шкала предусматривает группирование изучаемых признаков или свойств в классы (категории) и обозначение этих категорий определенными символами или логическими понятиями. Приписывание классам (группам) различных обозначений предполагает лишь их отличие друг от друга, но не преобладание одного класса над другим. Например, если разные вкусовые качества обозначить числами 1 (сладкое), 2 (соленое), 3 (кислое) и 4 (горькое), то это ни в коей мере не означает, что $2 > 1$ или $3 < 4$. Разделение на группы свидетельствует лишь о том, что они отличаются друг от друга. Поэтому нахождение численных отношений между группами бессмысленно.

Крайним вариантом номинальной шкалы является дихотомическая шкала наименований, когда изучаемые объекты по какому-либо критерию делятся на две группы, например, 1 - мужчина, 0 - женщина; 1 - верующий, 0 - атеист и т.д.

Порядковая (ординарная) шкала предполагает ранжирование ряда объектов по какому-либо признаку. Примеры: места, занятые школьниками или студентами на олимпиадах, спортивных состязаниях и т.д., ранжирование испытуемых по коэффициенту интеллектуальности, студентов - по среднему баллу успеваемости и пр. Порядковая шкала (если ранг задан числами 1, 2, 3, ..., n) устанавливает, что $1 > 2 > 3 \dots$ (или наоборот), но не определяет степень различия, т.е. не позволяет количественно сравнивать между собой выраженность свойства (признака) объектов, отнесенных к разным классам.

Интервальная шкала предполагает точку отсчета (условный нуль на шкале), а также определение равенства или неравенства интервалов внутри исследуемого ряда. Пример - температурная шкала Цельсия. На интервальной шкале правомерны операции сложения и вычитания, но невозможны операции умножения, деления и возведения в степень. Так, если вчера на улице было $+5^{\circ}$, а сегодня $+10^{\circ}$ по Цельсию, то мы можем сказать, что сегодня на 5 градусов теплее, чем вчера. В то же время мы не можем утверждать, что сегодня вдвое теплее, чем вчера, поскольку нуль на шкале Цельсия - произвольная точка, которая не указывает на отсутствие измеряемого свойства.

Шкала отношений отличается от интервальной шкалы тем, что нулевая точка не произвольна, а указывает на полное отсутствие свойства. Примеры шкал отношений - шкалы длины, массы, времени, площади, объема, расстояния и т.д. Предусматривает любые виды математических операций. Является наиболее информативной шкалой, на ней основано измерение практически всех физических величин.

Существуют определенные приемы и методы работы с различными типами шкал (возможные трансформации шкалы, определение уровней связи между шкалами и т.д.), однако это не является предметом психофизики, а подробно рассматривается в курсе "Математические методы в психологии".

3.2. МЕТОДЫ ПСИХОФИЗИЧЕСКОГО ШКАЛИРОВАНИЯ

Психофизическое шкалирование, по сути дела, представляет собой своеобразную "градуировку" субъективных шкал (шкал ощущений, оценок, суждений и т.д.) по отношению к физическим шкалам сенсорного раздражителя. Классификация методов шкалирования может быть дана по принципиально разным критериям. Так, выделяют метрические и неметрические методы, методы одномерного и многомерного шкалирования, вербальные и невербальные, "активные" и "пассивные" методы и т.д. В данном разделе мы остановимся на методах, наиболее часто используемых в психофизике.

3.2.1. Методы воспроизведения и идентификации

Метод воспроизведения (репродукции) сигнала состоит в том, что испытуемый, активно манипулируя разного рода кнопками, клавишами, регуляторами и пр., должен воспроизвести значение предъявляемого ему стимула (S_p) как можно точнее. Таким образом, предъявляя (как правило, в случайном порядке) разные стимулы, экспе-

риментатор получает соответствующий им ряд воспроизводимых значений (S_r).

Обработка результатов может производиться как для каждого отдельного стимула, так и для их совокупности. В первом случае может быть вычислена абсолютная или относительная ошибка воспроизведения каждого сигнала. Абсолютная ошибка представляет собой разность значений воспроизводимого и предъявляемого сигналов, взятая либо по абсолютной величине ($\sigma_a = S_r - S_p$); либо по модулю ($\sigma_a = |S_r - S_p|$), если знак разницы не имеет значения. Относительная ошибка вычисляется как отношение абсолютной ошибки к величине предъявляемого раздражителя: $\sigma_r = (S_r - S_p)/S_p$. При построении субъективной шкалы анализируется вид функции $S_r = f(S_p)$. Как правило, эта функция имеет вид степенной зависимости с показателем, несколько меньшим единицы.

Метод идентификации, в отличие от воспроизведения, является "пассивным" методом: испытуемый не манипулирует с величиной сигнала; он должен лишь выбрать значение стандартного стимула в ряду раздражителей, предъявляемых экспериментатором. Обработка данных включает в себя вычисление вероятности идентификации различных сигналов как стандарта.

Методы воспроизведения и идентификации довольно редко используются для изучения сенсорно-перцептивных процессов, однако представляют определенную ценность для изучения кратковременной памяти, так как позволяют оценить характер трансформации субъективного образа сигнала при его запечатлении и хранении.

3.2.2. Интервальные методы

Интервальные методы подразумевают ознакомление испытуемого с диапазоном предъявляемых сигналов: $r_s = S_{min} \div S_{max}$. Задача испытуемого состоит в том, чтобы, ориентируясь на максимальное и минимальное значения стимула, подобрать среднее значение, которое делит заданный диапазон на две субъективно равные части. В данном случае может использоваться как "активная" модификация метода, когда испытуемый сам манипулирует со значениями сигнала, так и "пассивная", когда ряд сигналов, расположенных внутри заданного диапазона, предъявляется экспериментатором, а задача испытуемого состоит в отнесении каждого из этих сигналов к одной из трех категорий ("больше середины", "середина" и "меньше середины"). В некоторых случаях дается инструкция подбирать не среднее значение стимула, а такое, которое делит диапазон на две части, находящиеся в заданном соотношении (например, 1:2, 1:3, 2:3 и т.д.).

При построении интервальных шкал отмечено, что они могут иметь характер различных психофизических функций - линейной, логарифмической, степенной или же функций промежуточного типа. Вид функции в значительной степени зависит от модальности раздражителя, а также от ширины предъявляемого диапазона. Замечено, что при расширении этого диапазона субъективная средняя точка закономерно смещается в сторону максимального значения. Это объясняется тем, что увеличение диапазона стимулов ведет к закономерному переходу от интервальной шкалы к шкале отношений.

3.2.3. Методы группировки (категориальные методы)

Имеют много общего с интервальными. Задача испытуемого состоит в том, чтобы относить сигналы, значения которых лежат внутри заданного диапазона, к одной из групп (категорий), число и обозначения которых задаются экспериментатором. Категории могут обозначаться числом: 1, 2, ..., n (при этом количество их, как правило, не превышает десяти), либо качественными определениями типа "тусклый", "яркий", "легкий", "тяжелый" и т.д. При обработке результатов качественные обозначения могут быть переведены в количественные, хотя эта процедура в известной степени произвольна и правомерность ее математически не обоснована.

Как правило, категориальные шкалы имеют вид функции, промежуточной между логарифмической и степенной зависимостью, причем увеличение числа используемых категорий ведет к закономерному изменению кривизны функции (от почти логарифмической до почти степенной).

3.2.4. Методы оценки

Являются наиболее распространенными методами психофизического шкалирования. Суть их состоит в том, что предъявляемые раздражители должны быть оценены числами (как целыми, так и дробными) по отношению к стандартному стимулу, которому присваивается определенное численное значение (как правило, 1, 10 или 100).

Оценка должна даваться по принципу: во сколько раз значение сигнала больше (меньше) стандарта, во столько же раз его оценка должна быть больше (меньше) численного обозначения, присвоенного стандартному стимулу. В некоторых случаях оценка стимула может даваться без использования стандарта (при условии, что испытуемый предварительно ознакомлен с предъявляемым стимуль-

ным рядом). Такая модификация метода более предпочтительна при изучении индивидуальных особенностей испытуемых, поскольку вносит минимум ограничений, а следовательно, обеспечивает испытуемому большую свободу в выборе оценок.

Естественно, что при использовании методов оценки возникает ряд вопросов, связанных с выбором стандарта (должен ли он иметь минимальное или максимальное значение в предъявляемом ряду сигналов или занимать промежуточное положение), с выбором численного обозначения, присваиваемого стандарту, с порядком предъявления сигналов и т.д. Все эти вопросы решаются экспериментатором исходя из конкретных задач данного исследования.

Шкалы оценки в большинстве случаев подчиняются степенному закону Стивенса, причем величина показателя степени зависит не только от сенсорной модальности, но и от ряда других факторов, о чем пойдет речь в следующем разделе.

3.2.5. Методы установки (продуцирования)

В данном случае испытуемый решает задачу, в принципе, противоположную оценке. Экспериментатор предъявляет стандартный сигнал и сообщает его численное значение. Затем испытуемый должен подбирать (устанавливать) значения сигналов в соответствии с числами, задаваемыми экспериментатором. Характер субъективных шкал, в принципе, мало чем отличается от шкал оценки, за исключением некоторых различий в величине показателя степени функции Стивенса.

Наиболее простыми модификациями методов продуцирования являются *методы мультипликации и фракционирования*. Первые (мультипликация) предполагают подбор стимула в N раз больше, вторые (фракционирование) - в N раз меньше предъявляемого. В простейшем случае это - равноделение или удвоение значения стандарта, т.е. подбор стимула вдвое меньшего или вдвое большего по сравнению со стандартом. В некотором смысле эти методы можно считать как бы промежуточными между методами установки и воспроизведения.

3.2.6. Кросс-модальный подбор

Задача испытуемого состоит в подборе стимулов одной модальности к стимулам другой (предъявляемой экспериментатором) по принципу соответствия: чем больше (меньше) величина предъявляемого сигнала, тем больше (меньше) величина сигнала, устанавливаемого испытуемым. Например, испытуемому предъявляются све-

товые вспышки разной яркости, в ответ на которые он должен подбирать звуки разной громкости и т.д.

В отличие от большинства предыдущих методов, шкалы кросс-модального подбора (как предъявляемая, так и подбираемая) представлены значениями физических величин сигнала. В этом плане метод кросс-модального подбора аналогичен методу воспроизведения и его можно рассматривать как двухмодальный вариант последнего.

С целью стандартизации кросс-модального подбора в лаборатории Стивенса в качестве подбираемой модальности была предложена динамометрическая шкала: испытуемый должен был сжимать динамометр с силой, пропорциональной величине предъявляемого стимула. Этим методом были определены основные параметры психофизических функций (в первую очередь, величина экспоненты Стивенса) для стимулов разной сенсорной модальности.

3.2.7. Неметрическое и многомерное шкалирование

Методы неметрического и многомерного шкалирования стоят несколько особняком от других. В основе их, как правило, лежат оценки сходства или различия между сигналами. Обычно испытуемому задается размерность шкалы оценок (чаще всего 10- или 100-балльная шкала). Например, если два стимула абсолютно идентичны, то эта пара обозначается нулем (отсутствие различий), если же наблюдатель не находит между ними никакого сходства (абсолютное различие), он обозначает пару максимальным баллом шкалы и т.д. Чаще всего неметрическое и многомерное шкалирование используется в тех случаях, когда физическая шкала стимула не является одномерной, например, при шкалировании вкусовых качеств, цветовых оттенков и т.д.

В заключение можно отметить следующее. Различные методы шкалирования зачастую дают психофизические шкалы, не совпадающие друг с другом. Поэтому наиболее ценную информацию об организации исследуемых шкал можно получить, используя весь арсенал методов в их совокупности. В то же время следует подчеркнуть, что психофизические шкалы (независимо от метода) не являются шкалами ощущений в прямом смысле слова - они вовлекают в себя, кроме сенсорно-перцептивных процессов, разного рода мыслительные (интеллектуальные) операции (оценку сходства, различия, величины и пр., отнесение стимулов к той или иной категории, идентификации их со стандартом и т.д.). Поэтому неудивительно, что результирующие шкалы далеко не всегда описываются логар-

рифмическим законом Фехнера, который основан на оценке разницы ощущений, вызываемых близкими между собой раздражителями. В этом, очевидно, и лежит основная причина несовпадения между собой двух "основных психофизических законов".

3.3. ЭФФЕКТЫ (ФЕНОМЕНЫ) ШКАЛИРОВАНИЯ

Сущность эффектов, или феноменов, психофизического шкалирования состоит в том, что параметры психофизической функции зависят не только от модальности сенсорного раздражителя, как это постулировалось в свое время Стивенсом, но могут также изменяться при варьировании процедуры эксперимента. Чаще всего изменение параметров функции касается ее крутизны (для степенной зависимости - величины показателя степени), которая может меняться либо во всем диапазоне физических величин исследуемого признака, либо в локальных его участках. Часто даже при шкалировании стимулов одной и той же сенсорной модальности эти изменения могут быть весьма существенны, и это не может не сказаться на результатах психофизического эксперимента.

Для удобства рассмотрения все эффекты шкалирования можно разделить на 4 типа: 1) пороговые эффекты; 2) эффекты, связанные с шириной исследуемого диапазона; 3) эффекты, связанные с последовательностью предъявления стимулов; 4) эффекты, обусловленные информационной значимостью тех или иных сигналов.

3.3.1. Пороговые эффекты

Чаще всего пороговые эффекты проявляются в виде возрастания крутизны психофизической функции вблизи абсолютного порога (рис.14, а). Причина этого состоит, очевидно, в ухудшении различительной способности сенсорных систем в околопороговой области. Отсюда и ухудшение субъективных оценок - при шкалировании стимулов малой интенсивности испытуемые дают более грубые, менее дифференцированные оценки, что и ведет к возрастанию крутизны функции. Несомненно, что это явление имеет общую природу с нарушением правила Бугера - Вебера вблизи абсолютного порога: снижение дифференциальной чувствительности закономерно должно приводить к огрублению оценок.

Аналогично поправке Брока - Гельмгольца для дифференциального порога был предложен ряд поправок формулы Стивенса для объяснения порогового эффекта. Наиболее простая из них - введение в формулу пороговой константы: $R = k \cdot S^n + a$, где кон-

станта a представляет собой достаточно малую величину, которая оказывает влияние только при малых значениях S .

Существуют и другие выражения закона Стивенса с поправками на величину абсолютного порога: $R = k(S - S_0)^n$, $R = k(S^n - S_0^n)$ и др. По поводу того, какая из этих модификаций степенного закона лучше описывает экспериментальные данные, существуют некоторые разногласия. Следует отметить, что пороговые эффекты для стимулов разной сенсорной модальности выражены в неодинаковой степени, а в ряде случаев, например, при шкалировании пространственных параметров (длина, площадь и пр.) они вообще не проявляются, а для шкалирования времени имеют принципиально иную природу.

3.3.2. Эффекты, связанные с шириной исследуемого диапазона

Известно, что ширина диапазона физических характеристик оказывает существенное влияние на форму и параметры психофизических функций. Так, при использовании методов интервального шкалирования, как уже отмечалось, субъективная средняя точка может менять свое положение в диапазоне: чем шире исследуемый диапазон, тем больше смещается положение точки в сторону максимума. Очевидно, при расширении диапазона стимулов происходит закономерный переход от интервальной шкалы к шкале отношений.

Методы оценки, установки и кросс-модального подбора обнаруживают четкую закономерность, известную в психофизике как *эффект диапазона*: чем шире исследуемый диапазон, тем меньше крутизна психофизической функции, т.е. тем меньше величина показателя степени функции Стивенса (рис. 14, б). Наиболее разумное объяснение этого феномена состоит в том, что субъективная шкала оценок является достаточно жесткой, стабильной и не может варьировать в значительных пределах. В то же время в психофизическом опыте экспериментатор может "навязать" испытуемому практически любой диапазон физических характеристик. Величина же показателя степени является своего рода "коэффициентом сопряженности" между физической и субъективной шкалами, который позволяет сенсорной системе оптимальным образом "подогнать" лабильную физическую шкалу к жесткой субъективной шкале.

Как было установлено, эффект диапазона может быть описан достаточно простым уравнением следующего вида:

$$\log n = \log a_r - k_r \cdot \log(\log r_s),$$

где n - показатель степени, r_s - диапазон стимулов, k_r - коэффициент пропорциональности, который для стимулов разной модальности может варьировать в пределах от 0,06 до 0,57, и a_r - константа.

Отсюда следует, что величина показателя степени является в свою очередь степенной функцией логарифма диапазона физических величин:

$$n = a_r / (\log r_s)^k.$$

Частным вариантом эффекта диапазона является зависимость крутизны психофизической функции от числа стимулов, предъявляемых в фиксированном физическом диапазоне раздражителей. Чем больше этот диапазон насыщен стимулами, тем больше величина показателя степени. Другими словами, чем больше плотность расположения стимулов, тем больше увеличивается, "растягивается" диапазон оценок. В этом случае увеличение диапазона субъективных оценок можно объяснить суммированием отдельных поддиапазонов (межстимульных интервалов). Математическое описание этого феномена мало отличается от описания эффекта диапазона и в общем виде может быть представлено следующей формулой:

$$\log n = \log a_d + k_d \cdot \log d,$$

где d - плотность расположения стимулов в диапазоне:

$$d = (N - 1) / \log r_s.$$

Отсюда:

$$n = a_d \cdot d^k = a_d \cdot [(N - 1) / \log r_s]^k.$$

При этом для разных сенсорных модальностей величина экспоненты k_d может варьировать от 0,13 до 0,37.

3.3.3. Эффекты, связанные с последовательностью предъявления стимулов

Как правило, оценки одних и тех же сигналов, предъявляемых в возрастающей и убывающей последовательности, не совпадают друг с другом. Наиболее ярко это проявляется при использовании метода группировки, где средние значения категорий, присваиваемых стимулам возрастающего ряда, будут больше по сравнению с убывающим рядом сигналов. Это - явление, которое по аналогии с известным физическим феноменом получило название *психофизического гистерезиса* (рис. 14, в). Детальное исследование этого явления показало, что в его основе лежит, по меньшей мере, две причины. Первая - это сенсорная адаптация. Установлено, что для тех модальностей, к которым сенсорные системы хорошо адаптируются (например, для восприятия яркости света, громкости звука или интенсивности вкусового ощущения), гистерезис выражен значительно лучше, чем для низкоадаптируемых (например, для восприятия и оценки тяжести груза). Второй причиной психофизического гистерезиса является относительность суждений (оценок). Испытуемые дают завышенные оценки по отношению к предыдущему стимулу,

если он меньше предъявляемого, и заниженные, когда соотношения между ними обратные. Это зависит как от относительной величины двух сравниваемых сигналов, так и от того, манипулирует ли испытуемый с прямым или обратным рядом численных значений.

В наиболее общем виде эффект последовательности был сформулирован Д.Кроссом и Л.Уордом. Он состоит в том, что на оценку каждого сигнала оказывают влияние оценки предыдущих сигналов. Другими словами, каждый сигнал играет роль своеобразного "якоря" (переменной точки отсчета), по отношению к которому оцениваются последующие стимулы. Д.Кросс предложил модификацию формулы Стивенса, учитывающую эффект последовательности, в следующем виде:

$$R_j = a S_j^n \cdot (S_i/S_j)^b = a S_j^m \cdot S_i^b,$$

где $m = n - b$.

В данном уравнении S_j - величина оцениваемого сигнала, S_i - величина предшествующего сигнала и R_j - оценка j -го стимула.

Учитывая, что на оценку сигнала оказывает влияние не один, а, по меньшей мере, до пяти предшествующих стимулов, Л.Уорд усложнил формулу Кросса:

$$R_j = a \cdot S_j^n \cdot (S_{j-1}/S_j)^{b_1} \cdot (S_{j-2}/S_j)^{b_2} \cdot \dots \cdot (S_{j-5}/S_j)^{b_5},$$

что, в принципе, не меняет существа дела. Однако следует отметить, что влияние предшествующих сигналов прогрессивно ослабевает по мере их удаления от оцениваемого, т.е. $b_1 > b_2 > \dots > b_5$.

При детальном изучении эффекта последовательности показано, что оценка зависит не столько от абсолютной величины предшествующего стимула, сколько от соотношения величин предыдущего и последующего сигналов.

3.3.4. Эффекты, связанные с информационной значимостью стимула

Как правило, испытуемые оценивают предъявляемые им раздражители по отношению к определенному стандарту, который играет роль своеобразной точки отсчета. Поэтому неудивительно, что оценка стимулов, мало отличающихся от стандартного (другими словами, стимулов, расположенных в окрестности стандарта), будет осуществляться более успешно, нежели остальных - близкие между собой по величине сигналы легче сравнивать между собой, а следовательно, и оценивать. Графическим выражением этой закономерности является то, что психофизическая функция вблизи стандарта является более пологой, чем в других ее участках.

Одной из разновидностей рассматриваемой закономерности является так называемый *якорный эффект*. Он проявляется в том, что

если один из сигналов предъявляется с большей частотой (вероятностью), чем другие, то он начинает выполнять роль "якоря" (дополнительной точки отсчета) и крутизна функции в окрестности такого якоря также будет уменьшаться (рис. 14, з).

Другой разновидностью рассматриваемых эффектов является *эффект модуля*, или *эффект потолка* (рис. 14, д). Он заключается в следующем. Одному и тому же стандартному стимулу экспериментатор может присваивать разные численные значения (модуль) (например, 1, 5, 10, 20 и т.д.). Суть эффекта состоит в том, что чем больше это значение (на рис. 14, д - M_1 , M_2 , M_3), тем меньше крутизна функции. Хотя эффект модуля также связан с информационной значимостью стандарта (присвоенным ему численным значением), он имеет много общего с эффектом диапазона и еще раз иллюстрирует жесткость, ригидность шкалы субъективных оценок, которая не может расширяться бесконечно, а наоборот, как бы противодействует навязываемой в эксперименте все увеличивающейся шкале численных значений.

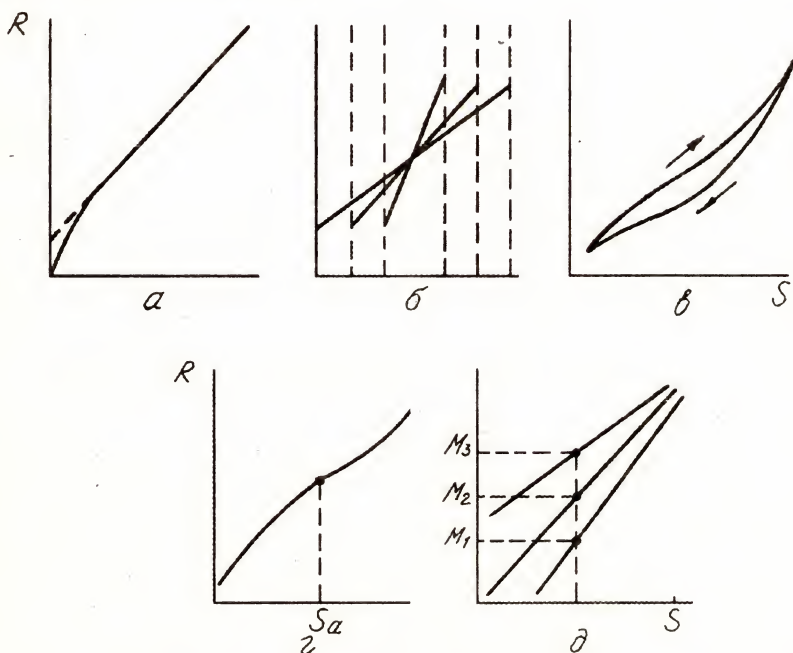


Рис. 14. Эффекты психофизического шкалирования: а - пороговый эффект, б - эффект диапазона, в - психофизический гистерезис, г - якорный эффект, д - эффект "потолка"

В завершение можно отметить следующее. Несмотря на то, что эффекты шкалирования значительно усложняют классическую формулу Стивенса, они не опровергают ее, а лишь дополняют и конкретизируют по отношению к различным модификациям процедуры психофизического эксперимента. Эффекты психофизического шкалирования вскрывают более тонкие закономерности работы сенсорных систем, закономерности сенсорно-перцептивных процессов в целом, чем те, которые подразумевались во время формулировки "основного психофизического закона".

3.4. ОСНОВНОЙ ПСИХОФИЗИЧЕСКИЙ ЗАКОН И ЕГО СОВРЕМЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Как уже отмечалось, на сегодняшний день существует по меньшей мере два математических выражения, претендующих на звание основного психофизического закона. Первое из них - логарифмическая функция Фехнера, которая выводится косвенным путем из правила постоянства дифференциальных порогов и утверждает, что величина ощущения пропорциональна логарифму силы раздражителя:

$$R = k \cdot \log S.$$

Второе - степенной закон Стивенса, который вытекает непосредственно из данных эксперимента по субъективному шкалированию:

$$R = k \cdot S^n.$$

Существуют и другие выражения психофизических законов (линейная, экспоненциальная, тангенциальная и другие формы зависимости), которые, тем не менее, имеют ограниченные области применения.

В психофизике неоднократно предпринимались попытки "примирения" логарифмического и степенного законов, хотя, справедливости ради, надо отметить, что они отражают разные стороны сенсорно-перцептивных процессов. В самом деле, различие двух близких между собой сигналов и субъективная оценка сигналов, значительно отличающихся друг от друга по своим физическим характеристикам, - не одно и то же. Очевидно, в первом случае субъект выносит свое суждение исключительно на основе двух сиюминутных сенсорных впечатлений, используя элементарные вербальные категории "больше", "меньше" или "равно". Для этого не требуется каких-либо эталонов сравнения, так как сравниваются между собой два образа, хранящиеся короткое время в оперативной памяти. Другое дело - оценка сигнала, которая подразумевает не только сопоставление образа сигнала с эталоном (стандартом), но и опера-

ции с численной шкалой, которая хранится в долговременной памяти. Другими словами, субъективная оценка основана на внутренней эталонной шкале и предполагает поиск, выбор необходимого эталона сравнения, т.е. вовлекает мыслительную деятельность субъекта. Отсюда, субъективная величина R , которая фигурирует и в законе Фехнера, и в законе Стивенса, очевидно, не одно и то же.

По сути, проблема формулировки основного психофизического закона сводится к нахождению такой математической формулы, которая описывала бы взаимосвязь между физическими величинами и их субъективным выражением независимо от метода исследования, сенсорной модальности, всевозможных преобразований эксперимента и т.д.

В 60-е годы Д. Мак-Кей и Г. Экман почти одновременно высказали мысль о том, что степенную функцию Стивенса более логично во всех отношениях рассматривать как двойную логарифмическую функцию типа:

$$\log R = n \cdot \log S,$$

где величину показателя степени можно рассматривать как своего рода "коэффициент сопряжения" между двумя шкалами - физической и психической (субъективной). По сути дела, к такой же мысли пришел Ю.М.Забродин, предложивший выражение основного психофизического закона в виде дифференциального уравнения, включающего дополнительную экспоненту z :

$$dR/R^z = dS/S.$$

По мнению Ю.М.Забродина, экспонента z может принимать значения от 0 до 1. Нетрудно видеть, что если $z = 0$, то левая часть уравнения превращается в dR и интегрирование этого выражения приводит к логарифмической функции Фехнера. Если же $z = 1$, то интегрирование уравнения дает степенной закон Стивенса. При $0 < z < 1$ можно получить семейство математических функций, промежуточных между логарифмическими и степенными.

Дж.Бэрд и Э.Нома выдвинули четырехальтернативную модель, согласно которой в дифференциальном уравнении должна присутствовать не одна, а две экспоненты:

$$R/R^x = dS/S^y.$$

Учитывая, что каждая из экспонент может принимать значения 0 или 1, можно, в принципе, получить 4 формы психофизической зависимости - линейную, логарифмическую, степенную и экспоненциальную. Справедливости ради, надо отметить, что существование экспоненциальной психофизической функции остается под вопросом: по крайней мере экспериментально существование такой формы зависимости не доказано.

В 1989 году В.И.Лупандиным была выдвинута концепция иерархии психофизических функций, которая подробно анализируется в монографии "Психофизическое шкалирование" (Свердловск, 1989). Суть этой концепции состоит в том, что элементарные математические функции типа линейной, логарифмической, степенной и других форм зависимости могут описать лишь те психофизические взаимоотношения, которые соблюдаются при достаточно жестких, однозначных условиях эксперимента. Для того чтобы описать более общие закономерности, необходимо последовательное обобщение элементарных функций, что в свою очередь ведет к отказу от жестко детерминированных математических уравнений к вероятностному выражению психофизических законов (рис.15).

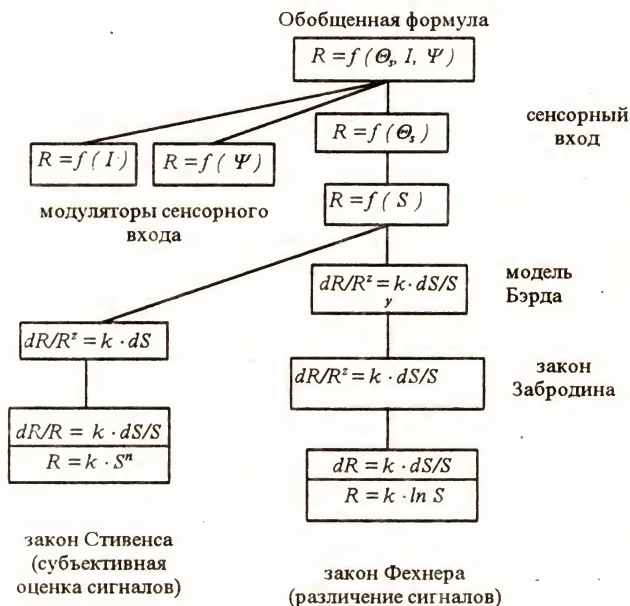


Рис. 15. Модель, иллюстрирующая концепцию иерархии психофизических функций

Рассмотренные выше эффекты и феномены психофизического шкалирования еще более усложняют общую картину и вынуждают исследователей в каждом конкретном случае вводить различные поправки, коррективы и т.д. Все это в конечном счете может привести к пессимистическому выводу о том, что единой, универсальной пси-

хофизической зависимости вообще не существует. Вероятно, так оно и есть. Однако, принимая во внимание чрезвычайную сложность психических (в данном случае сенсорно-перцептивных) процессов, наивно предполагать, что все они могут быть однозначно описаны элементарными математическими формулами. В данном случае известное выражение "природа стремится к простоте", повидимому, неприемлемо. С другой стороны, основная цель психофизики состоит не в том, чтобы любой ценой вогнать эмпирические закономерности в прокрустово ложе математических функций. Скорее, наиболее важной является прогностическая ценность описания этих закономерностей, а это может быть достигнуто путем использования вероятностных моделей. По сути дела, в этом и состоит сущность концепции иерархии психофизических функций.

Р а з д е л II

ПСИХОФИЗИКА ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

4. ПСИХОФИЗИКА ЗРЕНИЯ

Зрение у человека занимает ведущее место среди всех видов чувствительности. По мнению одного из крупных отечественных специалистов по психофизиологии зрения В.Д.Глезера, зрительная система принимает и анализирует до 90 процентов всей сенсорной информации. Зрение играет в жизни человека не только первосигнальную, но и второсигнальную роль (восприятие письменной речи - чтение, письмо и т.д.).

Поскольку зрительное восприятие всегда связано со светом (излучаемым или отражаемым), то, прежде чем говорить о психофизических закономерностях зрения, необходимо коснуться вопроса об основных характеристиках света.

4.1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТА

Мудрый Сократ в свое время высказал любопытную мысль: "Глаз видит потому, что он устроен так же как Солнце". Трудно сказать однозначно, что имел в виду древний философ. Однако если перефразировать это выражение, то все становится на свои места: "Глаз видит потому, что существует Солнце". Действительно, Солнце является фактически единственным (не считая звезд) естественным генератором того спектра электромагнитных излучений, который мы называем видимым светом.

Электромагнитные колебания, излучаемые Солнцем, могут быть охарактеризованы частотой (f) и длиной волны (λ). Соотношения между этими параметрами, как и для любого колебательного процесса, достаточно просты: $f = v/\lambda$ и $\lambda = v/f$, где v - скорость распространения колебаний (в данном случае $v = 3 \cdot 10^7$ м/с).

Диапазон длин волн электромагнитных колебаний чрезвычайно велик (приблизительно от 10^{-12} до 10^6 м). Однако зрительная система человека способна воспринимать лишь очень узкий участок этого диапазона (от 4 до $8 \cdot 10^{-7}$ м, или, иначе, от 400 до 800 нм). Этот участок длин волн и называется видимым светом.

Различают хроматический и ахроматический свет. Хроматический свет соответствует колебаниям со строго определенной длиной волны. Он воспринимается как вполне определенный цвет (цветовой тон), о чем пойдет речь в следующих разделах. Ахроматический свет включает в себя колебания в широком диапазоне длин волн и воспринимается (в зависимости от яркости излучения) от белого до темно-серого. Кроме того, различают свет излучаемый и отражаемый; для каждого из них существуют свои физические единицы измерения.

Основной физической единицей является *сила света* (I_v), испускаемого точечным источником. Она определяется по соответствующему эталону и выражается в канделах (кд).

Световой поток (Φ_v) вычисляется как произведение силы света и величины телесного угла, в котором распространяется свет: $\Phi_v = I_v \cdot \Omega$. Единицей светового потока является люмен (лм), равный 1 канделе, умноженной на 1 стерадиан: $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$.

Световая энергия (Q_v) равна произведению величины светового потока на время действия света: $Q = \Phi_v \cdot t$ и выражается в люмен-секундах.

Единицы силы света, светового потока и световой энергии применимы к точечному источнику, хотя в реальных условиях зрительной системе чаще приходится иметь дело с источниками света, имеющими определенную пространственную протяженность. Для протяженных источников света используют такие единицы измерения как яркость и светимость.

Яркость (L_v) выражается в канделах на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) и соответствует отношению силы света протяженного источника к площади светящейся поверхности: $L_v = I_v/S$.

Светимость (M_v) соответствует отношению светового потока, испускаемого светящейся поверхностью, к площади этой поверхности: $M_v = \Phi_v/S$. Выражается в люменах на квадратный метр ($\text{лм}/\text{м}^2$).

Интенсивность *отраженного света* характеризуется *освещенностью* (E_v) отражающей поверхности, которая также вычисляется как отношение величины светового потока к площади ($E_v = \Phi_v/S$) и выражается в люменах на квадратный метр, или в люксах (лк): $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/\text{м}^2$. Другими словами, 1 люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м^2 при падающем на нее световом потоке в 1 люмен.

4.2. ВОСПРИЯТИЕ СВЕТА

Зрительная система способна работать в исключительно широком диапазоне изменения интенсивности светового раздражителя - от $10^{-6} \div 10^{-5}$ кд/м², что приблизительно соответствует абсолютному порогу световой чувствительности в условиях темновой адаптации, до $10^4 \div 10^5$ кд/м² (это значение близко к уровню интенсивности, вызывающему тепловой ожог сетчатки). Чрезвычайно широкий диапазон восприятия амплитудных характеристик света связан, во-первых, с высокой адаптационной способностью зрительной системы, во-вторых, с трансформацией физической шкалы яркости на уровне нейрофизиологических механизмов, что имеет своим следствием выраженную нелинейность психофизических функций восприятия яркости.

4.2.1. Абсолютные пороги световой чувствительности

Световая чувствительность характеризует способность зрительной системы воспринимать излучение света. Наибольшую световую чувствительность глаз имеет в темноте. Минимальное количество света, необходимое в этих условиях для возникновения ощущения, называют *абсолютным порогом*. Палочка сетчатки глаза способна возбуждаться при действии всего 2 - 5 квантов света, однако для возникновения светового ощущения необходима суммация возбуждения нескольких рецепторов. Площадь, занимаемая близлежащими рецепторами, суммирующими возбуждение, называется зоной *пространственной суммации* и измеряется в относительных величинах - угловых градусах или угловых минутах. Диаметр зоны суммации неодинаков для центрального (колбочкового) и периферического (палочкового) зрения. В центре *fovea* он составляет 5 угл. мин., а на периферии сетчатки увеличивается до 1 угл. град.

В пределах зоны пространственной суммации действует закон Рико - Пайпера, согласно которому пороговый эффект может быть достигнут как увеличением интенсивности света, действующего на определенную площадь S , так и наоборот - увеличением площади освещаемой поверхности при неизменном световом потоке. Математическое выражение закона Рико - Пайпера: $IS = const$, т.е. для достижения уровня светового порога увеличение площади компенсирует уменьшение освещенности, и наоборот.

Кроме пространственной, известна и *временная суммация*: $It = const$ (закон Блоха - Шарпантье), причем эта закономерность спра-

ведлива лишь для коротких длительностей светового стимула ($t < 100$ мс).

4.2.2. Адаптация

Если человек находится в абсолютной темноте, то порог световой чувствительности постепенно снижается (на 3 - 4 порядка), причем в первые 7 - 8 минут - за счет колбочковой, а в дальнейшем - за счет палочковой адаптации.

Типичная кривая хода темновой адаптации представлена на рис.16. Видно, что она распадается на две ветви (колбочковую и палочковую). Колбочковая адаптация дает незначительное повышение световой чувствительности (в 50 - 100 раз), палочковая же в течение нескольких десятков минут приводит к весьма существенному (на несколько порядков) снижению абсолютного порога.

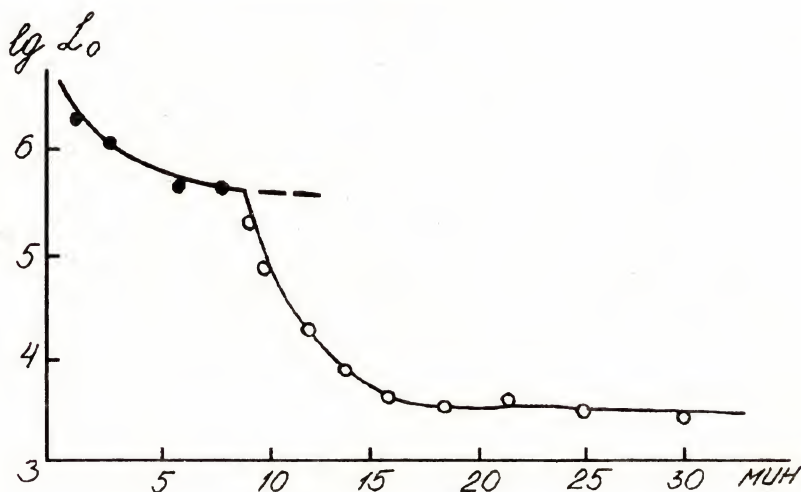


Рис. 16. Кривая хода темновой адаптации во времени: ветвь с заштрихованными кружками отражает работу колбочкового, с незаштрихованными - работу палочкового аппарата. По оси абсцисс - время, по оси ординат - уровень абсолютного порога в логарифмических единицах.

Изучение хода темновой адаптации (адаптометрия) имеет не только теоретическое, но и прикладное значение - для диагностики

различных нарушений световой чувствительности. Так, если световая чувствительность снижена, но форма кривой адаптации не изменена, то нарушение зрения связано с патологией светопроводящих путей (оптической системы глаза). Нарушение же формы адаптометрической кривой (ее уплощение, размывание границ между колбочковой и палочковой ветвью и пр.) позволяет заподозрить патологические изменения в рецепторном аппарате сетчатки.

4.2.3. Дифференциальная световая чувствительность

В повседневной жизни человеку редко приходится иметь дело со световыми раздражителями околопороговой интенсивности. Основное значение для зрения имеет контрастная чувствительность, т.е. способность различать между собой участки зрительного изображения, незначительно отличающиеся по освещенности. Как правило, измерение контрастной чувствительности проводится при определенном уровне адаптации субъекта.

Если тестирующий стимул (световое пятно определенной конфигурации), имеющий определенную яркость E , находится на освещенном фоне меньшей яркости E_ϕ , то минимальную разность $E - E_\phi$, которая еще воспринимается наблюдателем, называют *разностным (дифференциальным) порогом*: $\Delta E = E - E_\phi$, а отношение $\Delta E/E_\phi$ - *относительным дифференциальным порогом*, или *пороговым контрастом*. Правило Бугера - Вебера устанавливает, что $\Delta E/E_\phi = const$, т.е. разностный порог растет пропорционально яркости фона: $\Delta E = k \cdot E_\phi$.

Однако, как показали Кениг и Бродхун, это правило соблюдается лишь в диапазоне средних освещенностей, в то время как в области малых дифференциальная чувствительность значительно снижается (рис.17).

Фехнер и Гельмгольц предложили поправку к правилу Бугера - Вебера применительно к восприятию освещенности:

$$\Delta E / (E_\phi + E_0) = const,$$

где E_0 - величина так называемого собственного света сетчатки (в полной темноте наблюдатель видит слабое свечение, связанное со спонтанным распадом молекул зрительного пигмента). Согласно формуле Гельмгольца правило Бугера - Вебера выполняется только в том случае, когда $E_\phi \gg E_0$ и величиной E_0 можно пренебречь. Если же значения E_ϕ и E_0 сопоставимы, правило постоянства дифференциальных порогов нарушается.

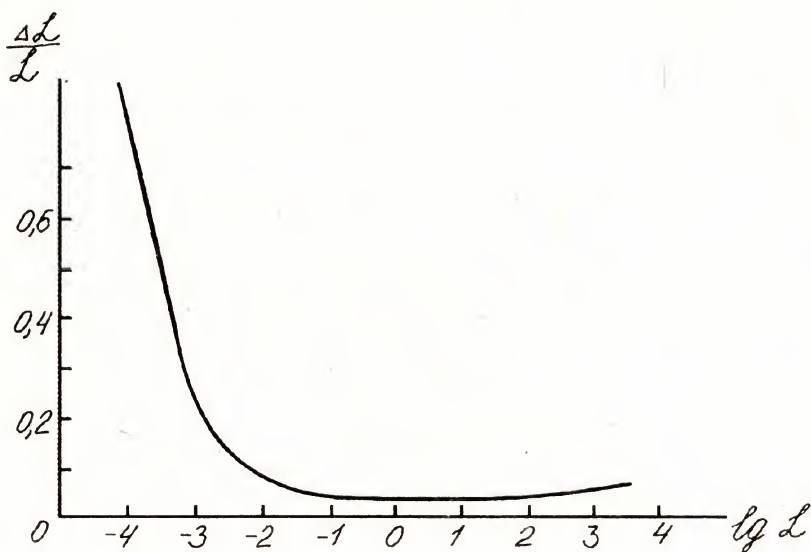


Рис. 17. Изменение относительного дифференциального порога по яркости в зависимости от интенсивности светового стимула

Вышеуказанные закономерности контрастной чувствительности справедливы в тех случаях, когда световой фон является однородным. При неоднородности светового фона, что чаще встречается в реальных условиях, дифференциальная чувствительность неодинакова в разных участках зрительного поля - дифференциальные пороги резко возрастают на границах перепада освещенностей. Для описания контрастной чувствительности в этих условиях чаще всего используют вероятностный подход и основные положения теории обнаружения сигнала (см. 2.1).

4.2.4. Субъективные шкалы яркости

Как правило, при конструировании психофизических шкал яркости используют излучаемый, а не отражаемый свет, поскольку интенсивность последнего зависит от оптических свойств отражающей поверхности и не всегда линейно связана с интенсивностью падающего на нее света.

В психофизических исследованиях с использованием прямых методов шкалирования показано, что в "стандартных" условиях (темновая адаптация, достаточно большой диаметр тестового пятна и

большая длительность его экспозиции) субъективная яркость связана с физической яркостью степенной зависимостью типа $R = k(L - L_0)^n$ с экспонентой $n = 0,33$, хотя индивидуальные показатели могут варьировать в значительных пределах (по некоторым данным, от 0,14 до 0,59). Существенно меняет параметры психофизической функции изменение условий световой стимуляции. В светоадаптированном состоянии величина показателя степени может увеличиваться до $0,4 \div 0,5$. В лаборатории С.Стивенса было показано, что при переходе от темновой адаптации к светоадаптированному состоянию изменяются все параметры степенной функции (в вышеуказанном уравнении - величины k , n и L_0). При этом показатель степени n и пороговая константа L_0 увеличиваются (последняя - приблизительно в миллион раз), а коэффициент k , наоборот, уменьшается.

Изменение параметров функции шкалирования имеет место и при варьировании диаметра тестирующего светового пятна. Так, при уменьшении диаметра пятна с 5 угл.град. до точечного источника света показатель степени увеличивается до 0,5. Считают, что в данном случае субъективная яркость представляет собой степенную функцию величины светового потока: $R = k \cdot \Phi^{0,5}$, т.е. пропорциональна корню квадратному из произведения площади и светимости: $R = k \cdot \sqrt{M_v \cdot S}$.

К увеличению показателя степени функции Стивенса приводит также изменение времени экспозиции светового стимула. При этом величина экспоненты повышается как при очень коротких, так и при длительных (десятки секунд) воздействиях раздражителя. При этом показано, что субъективная оценка яркости коротких световых вспышек представляет собой степенную функцию величины световой энергии: $R = k \cdot Q^{0,5}$, т.е. пропорциональна квадратному корню из произведения светового потока и длительности: $R = k \cdot \sqrt{\Phi \cdot t}$.

По-видимому, существуют достаточно сложные отношения между площадью тестирующего пятна и временем его экспозиции. Если уменьшается и то и другое (оценка яркости точечного источника света при очень короткой экспозиции), то величина показателя степени функции Стивенса может повышаться до единицы. Другими словами, в этих условиях субъективная оценка яркости описывается линейной функцией величины световой энергии: $R = k \cdot Q$.

Данные по влиянию других факторов на субъективную оценку яркости менее однозначны. Так, показано, что при оценке стимула на фоне индуцирующего поля более высокой яркости экспонента степенной функции может возрастать до единицы и более. По-видимому, определенную роль в оценке яркости играет спектраль-

ный состав света, хотя по данным шведских исследователей его влияние малосущественно. Показано также, что параметры психофизической функции меняются в зависимости от локализации изображения на сетчатке, причем соотношения между локализацией стимула и другими его параметрами (спектральным составом, временем экспозиции и пр.) являются достаточно сложными и неоднозначными.

Некоторые авторы считают, что степенная функция Стивенса с $n = const$ описывает психофизическую шкалу яркости только в области средних и высоких освещенностей. При приближении же к абсолютному порогу крутизна психофизической функции прогрессивно увеличивается и величина показателя степени приближается к единице. Показано также, что субъективная шкала яркости обнаруживает все описанные выше эффекты (феномены) шкалирования (см. раздел 3.3).

4.3. ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ

Ощущение цвета представляет собой субъективное качество, возникающее при воздействии на рецепторы сетчатки монохроматического света определенной длины волны. За восприятие цвета ответственны колбочки, имеющие в своем составе пигменты с различной спектральной чувствительностью. Согласно теории Ломоносова - Юнга - Гельмгольца, существует три "основных" цвета (красный, зеленый и синий), при смешении которых в разных пропорциях можно вызвать ощущение любого цвета или цветового оттенка. Соответственно этому в колбочках имеются три разновидности зрительного пигмента с максимумами поглощения в красном, зеленом и сине-фиолетовом участках спектра.

Исследование цветового зрения у человека проводят с помощью полихроматических таблиц или аномалоскопа (принцип работы последнего основан именно на эффекте смешения монохроматических цветов со строго фиксированной длиной волны). Более сложным является метод денситометрии, позволяющий непосредственно оценить спектральную чувствительность колбочкового аппарата.

4.3.1. Основные характеристики цвета

Как отмечалось ранее, зрительная система человека способна воспринимать относительно узкий диапазон электромагнитных колебаний - приблизительно от 400 до 800 нм (длина волны), или от $3,75 \cdot 10^{14}$ до $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц (частота колебаний). Волны с длиной менее 400 нм относят к ультрафиолетовому диапазону, а более 800 нм - к

инфракрасному участку спектра электромагнитных колебаний. В отличие от ультрафиолетовых лучей, для восприятия которых у человека не существует специализированных рецепторов, инфракрасное излучение улавливается терморецепторами, вызывая ощущение тепла. Психофизические закономерности чувства тепла и холода будут рассмотрены ниже. Здесь же будут освещены проблемы, связанные с закономерностями восприятия видимого участка спектра.

Несмотря на то, что физическая шкала частот (длин волн) монохроматического света одномерна и непрерывна, субъективная шкала воспринимаемых цветовых тонов в определенном смысле дискретна: субъект способен выделять "основные" и "промежуточные" цвета, хотя по поводу точного числа тех и других нет единого мнения. Наиболее популярна основанная на жизненном опыте номинальная шкала, включающая 7 основных градаций цвета - красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый с промежуточными (переходными) цветовыми оттенками между основными цветами. В таблице показано соответствие "основных" цветов их физическим параметрам - длине волны и частоте электромагнитных колебаний.

Соотношения длин волн и частот электромагнитных колебаний, соответствующих основным цветам видимого света

Цвет (цветовой тон)	Длина волны, нм	Частота, Гц · 10 ¹⁴
Красный	750	4,0
Оранжевый	630	4,8
Желтый	600	5,0
Зеленый	540	5,6
Голубой	500	6,0
Синий	480	6,2
Фиолетовый	400 ÷ 450	6,7 ÷ 7,5

Субъективная шкала цвета не является одномерной, так как помимо цветового тона включает в себя как минимум еще две переменных - светлоту и насыщенность.

Светлота (степень зачернения) поверхности, излучающей или отражающей свет, зависит в первую очередь от интенсивности светового потока (физической яркости, освещенности), но не исчерпывается ею. Большое значение для восприятия светлоты имеет и структура зрительного поля (перепад яркостей разноосвещенных объектов, световой контраст и т.д.).

В реальных условиях человеку довольно редко приходится иметь дело с источниками (или отражателями) монохроматического света. Чаще физические объекты излучают или отражают свет в опреде-

ленном диапазоне длин волн, т.е. воздействующий свет в большей или меньшей степени ахроматичен. Субъективно ширина воспринимаемого диапазона электромагнитных колебаний характеризуется насыщенностью того или иного цветового тона: при прочих равных условиях насыщенность цвета тем больше, чем выше степень его монохроматичности (т.е. чем уже полоса пропускания цветового спектра).

Необходимо отметить, что между тремя составляющими цвета (цветовым тоном, светлотой и насыщенностью) существуют достаточно сложные взаимоотношения. Субъективно это проявляется в том, что в реальных условиях гамма цветовых ощущений включает в себя не только все оттенки "основных" цветов, но также цвета, отсутствующие в спектре (например, бурый, коричневый, кирпичный и др.).

4.3.2. Цветоразличение

Способность человека различать близкие между собой оттенки монохроматического света может быть исследована с помощью общепринятых методов измерения разностных порогов (см. 2.2). На рис. 18 представлены данные Бедфорда и Выпещки, полученные на основе прямых пороговых измерений. Величина $\Delta\lambda$ соответствует разностному порогу двух близких между собой длин волн: $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_j$. Можно видеть, что величина разностного порога относительно стабильна в диапазоне от 410 до 600 нм и значительно увеличивается за пределами этого диапазона. В то же время на кривой имеются три максимума чувствительности (разностные пороги минимальны), которые соответствуют сине-фиолетовому, желто-зеленому и красному участкам спектра. Данные Бедфорда и Выпещки хорошо согласуются с результатами колориметрических исследований по изучению спектров поглощения сетчатки глаза. Это является хорошим подтверждением трехкомпонентной теории цветового зрения.

Разностные (дифференциальные) пороги по светлоте для монохроматических цветов несколько иные, нежели для субъективной яркости белого света, хотя в диапазоне максимальной чувствительности они практически совпадают (рис.19). Так же как и для ощущения яркости ахроматического света, в диапазоне средних освещенностей соблюдается правило Бугера - Вебера; для высоких и еще в большей степени для малых яркостей света оно нарушается (дифференциальные пороги увеличиваются).

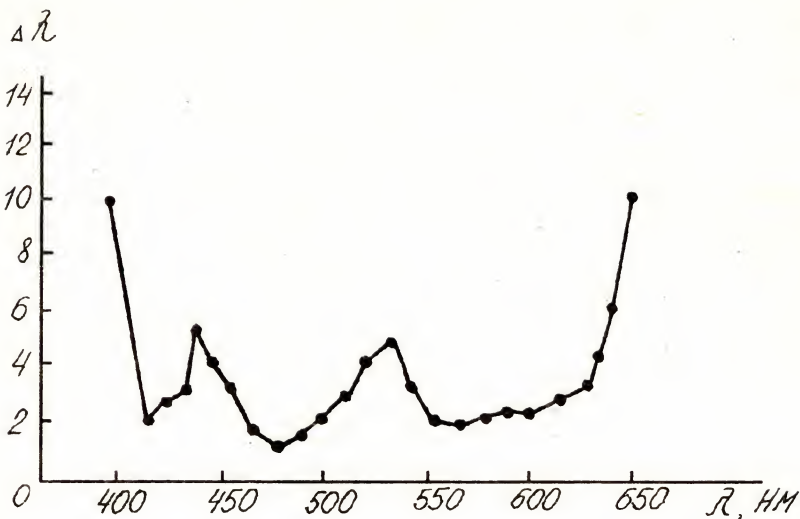


Рис. 18. Пороги различия цветового тона: по оси абсцисс - длина волны монохроматического света, нм; по оси ординат - величина дифференциального порога

Интересную модель цветоразличения, включающую в себя две составляющих цвета (цветовой тон и светлоту) предлагает Ч.А.Измайлов. Модель основана на многомерном шкалировании больших цветовых различий и в геометрической интерпретации представляет собой двумерную сферическую поверхность, на которой расположено все многообразие равноярких цветов (расстояния между точками соответствуют величине субъективных различий между соответствующими цветами).

4.3.3. Субъективные шкалы цветового зрения

Субъективная шкала цвета многомерна: как отмечалось ранее, она включает в себя по меньшей мере 3 переменных - цветовой тон, насыщенность и светлоту. Оценка *светлоты* (субъективной яркости) монохроматического света формирует метрическую шкалу, которая с хорошим приближением подчиняется закону Стивенса, причем величина показателя степени психофизической функции незначительно варьирует в зависимости от длины волны (от 0,32 до 0,38).

Насыщенность цветового тона также можно рассматривать как количественную переменную, субъективная оценка которой дает метрическую шкалу, в первом приближении описываемую степенной функцией Стивенса. В то же время величина показателя степени

этой функции значительно выше, чем для субъективной яркости, и составляет (для красного цвета) около 1,7. Это вполне объяснимо в терминах "эффекта диапазона" (см. 3.3), так как физический параметр насыщенности цвета может меняться в значительно более узких пределах, нежели физическая яркость источника света.

Третью составляющую (*цветовой тон*) в субъективном отношении нельзя назвать количественной, так как изменение длины волны (физическая переменная) ведет к изменению не интенсивности, а качества ощущения. Поэтому для описания ощущения цвета (субъективной оценки цветового тона) чаще всего используют неметрические методы шкалирования (см. 3.2) и моделирование субъективного "цветового пространства" в виде различных геометрических моделей.

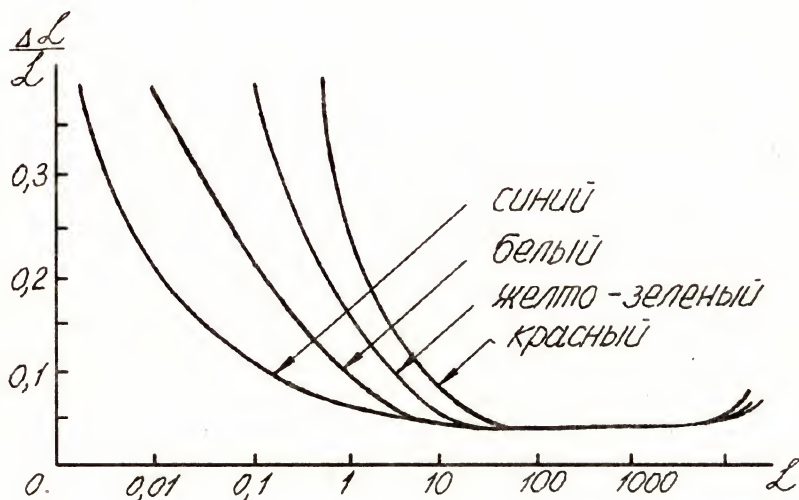


Рис. 19. Относительные дифференциальные пороги по светлоте для белого и некоторых монохроматических цветов (по оси абсцисс - яркость в логарифмических единицах)

4.3.4. Модели цветового зрения

Существующие на сегодняшний день модели цветового зрения представляют многообразие субъективно воспринимаемых цветов в форме геометрического (чаще евклидова) двух-, трех- или многомерного пространства. Рассмотрение этих моделей логично провести в хронологическом порядке. Первые из них (цветовой круг Ньютона

и цветовой треугольник Юнга - Максвелла) представляют субъективное пространство цветов в двумерной плоскости; более поздние модели (цилиндр Манселла и конусы Оствальда) - в трехмерном, а современная модель Соколова - Измайлова предполагает наличие четвертого измерения.

Цветовой круг Ньютона

Цвета, различаясь по цветовому тону от синего к зеленому, желтому, оранжевому, красному, через пурпурный соединяются с фиолетовым, образуя замкнутый ряд. В центре круга находится белый цвет; насыщенность каждого из монохроматических цветов возрастает от центра к периферии. Цветовой круг охватывает все множество самосветящихся единичных источников и часть цветов отражающих поверхностей; он не включает в себя цвета с разной степенью почернения (кирпичный, бурый, коричневый), характерные для окрашенных поверхностей (рис.20, а).

Треугольник Юнга-Максвелла

Аналогичен цветовому кругу Ньютона. Представляет собой равносторонний треугольник, на вершинах которого расположены основные цвета (красный, зеленый, синий); все остальные располагаются на сторонах и внутри треугольника. Так же, как и в модели Ньютона, в середине треугольника расположен белый цвет, а насыщенность каждого из монохроматических цветов возрастает от центра к периферии (рис. 20, б).

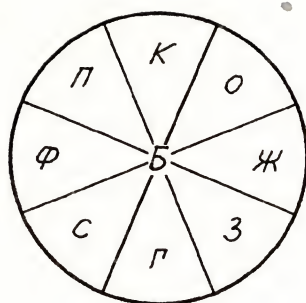
Цилиндр Манселла

Трехмерная модель в виде цилиндра, продольная ось которого соответствует ахроматической составляющей (светлоте) и включает в себя 10 градаций - от 1 (черный) до 10 (белый). Радиусы цилиндра соответствуют насыщенности цвета (15 градаций), а дуги окружности - цветовым тонам. В модели Манселла выделяется 10 цветовых тонов - пять основных (синий, зеленый, желтый, красный и пурпурный) и пять промежуточных (рис.20, в).

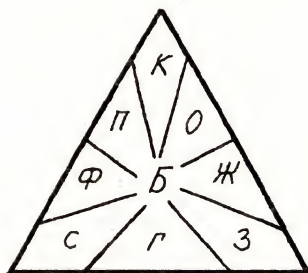
Модель Манселла представляет собой не что иное как стопку наложенных друг на друга кругов Ньютона, отличающихся друг от друга по величине ахроматической составляющей. Недостатком этой модели является то, что части объема цилиндра вблизи черного и белого оказываются не заполненными реальными цветами.

Конусы Оствальда

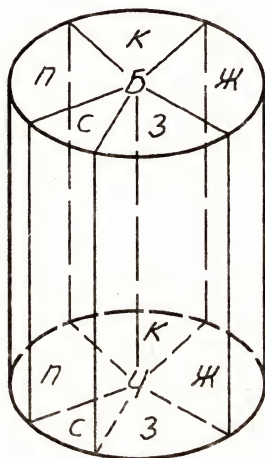
Модель представляет собой два конуса, соединенные основаниями. Линия, проходящая через вершины конусов, образует ахроматическую ось (рис. 20, г). Все остальное, в принципе, не отличается от модели Манселла. В отличие от последней, модель Оствальда практически исключает несуществующие цвета.



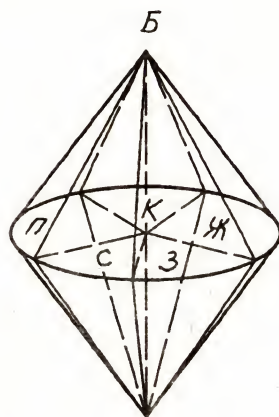
а



б



в



г

Рис. 20. Модели цветового зрения: а - цветовой круг Ньютона, б - треугольник Юнга-Максвелла, в - цилиндр Манселла, г - конусы Оствальда. Обозначения цветов: Б - белый, Ч - черный, К - красный, О - оранжевый, Ж - желтый, З - зеленый, Г - голубой, С - синий, Ф - фиолетовый, П - пурпурный

Сферическая модель Соколова - Измайлова

Разработана в 70 - 80-х годах в лаборатории Е.Н.Соколова. Имеет некоторые преимущества перед другими, поскольку рассматривает субъективное цветовое пространство как многомерное, а следо-

вательно, она избавлена от многих ограничений, с которыми сталкиваются другие модели. Модель представляет собой четырехмерную сферу в евклидовом пространстве. Спектральные изменения различной интенсивности отображаются точками на поверхности четырехмерной сферы так, что евклидовы расстояния между ними пропорциональны субъективным различиям между представляющими их цветами. Три угла, образующие полярные координаты четырехмерной сферы, совпадают с субъективными характеристиками цвета - цветовым тоном, насыщенностью и светлотой. Горизонтальный угол сферы соответствует цветовому тону, вертикальный - насыщенности, параметр светлоты предполагает введение четвертого измерения.

Кроме вышеперечисленных моделей цветового зрения, существует большое число определенным образом ранжированных по цвету диаграмм, таблиц, атласов (например, цветной атлас Хассельгрена, диаграммы цветности CIE и др.), которые имеют, в основном, прикладное значение. Некоторые модели представляют собой модификации вышеперечисленных. Так, система цветов DIN является модификацией модели Манселла, отличаясь от нее лишь в деталях. В этой системе шкала насыщенности зависит только от цветности и не меняется с изменением относительной светлоты; окружность цветовых тонов разделена не на 10 (как у Манселла), а на 24 части и т.д.

В заключение следует подчеркнуть, что модели цветового зрения представляют не только узко теоретический интерес, но имеют и важное практическое значение (для инженеров, дизайнеров, художников, клиницистов-офтальмологов и т.д.). Можно, в частности, отметить, что сферическая модель Соколова - Измайлова с успехом использована в клинике для диагностики разного рода цветоаномалий.

4.3.5. Феномены цветового зрения

В психологии и психофизике известны так называемые феномены одновременного и последовательного цветового контраста. Феномен одновременного контраста состоит в том, что определенный цветовой фон искажает или изменяет восприятие изображения, выполненного в другом цвете, или даже ахроматического изображения. Так, серое пятно на красном фоне приобретает зеленоватый оттенок, на зеленом - розоватый, на синем - грязно-желтый, а на желтом - голубоватый. Аналогично круги из цветной бумаги, помещенные на цветные листы не совпадающего (лучше всего, оппонентного) цвета субъективно приобретают другие, не свойственные им цветовые оттенки.

Феномен последовательного контраста впервые был описан Гете еще в начале прошлого столетия. Некоторым своим гостям Гете предлагал рассматривать изображение зеленого чертика на черном фоне. Когда после этого гость переводил изображение на белую стену, то видел на ней того же черта, но уже в ярко-красном исполнении.

Феномены одновременного и последовательного цветовых контрастов послужили основой теории оппонентных цветов Геринга. В настоящее время они нашли разумное нейрофизиологическое объяснение с точки зрения существования цветооппонентных рецептивных полей центральных нейронов зрительной сенсорной системы.

4.4. ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПРОСТРАНСТВА

Зрительную сенсорную систему по праву называют системой пространственного чувства, или пространственным анализатором (в отличие, например, от слуховой системы, для которой наиболее важным является восприятие временных соотношений между звуковыми сигналами). Наиболее важными пространственными характеристиками объектов, воспринимаемыми зрительной системой, являются их пространственная локализация, форма, размер, удаленность, направление и скорость перемещения объекта в поле зрения и т.д. Восприятие этих характеристик в значительной мере зависит от периферических структур зрительной системы (оптическая система глаза, устройство сетчатки и пр.), обеспечивающих нормальную остроту зрения, поле зрения и другие основополагающие свойства зрительного восприятия.

4.4.1. Острота зрения

Остротой зрения называют предельную пространственную разрешающую способность зрительной системы. Другими словами, острота зрения - это порог пространственного различения, своего рода "пространственный квант" зрения, который характеризует возможность различать мелкие детали рассматриваемого изображения.

Для измерения остроты зрения на практике чаще всего пользуются специальными таблицами, на которых на белом фоне изображены черные тест-объекты различного углового размера. Наблюдатель должен опознать те или иные буквы; определить, показывают ли ему две или одну точку или линию, разделенные промежутком; определить наклон решетки, состоящей из параллельных полос и т.д. Наибольшее распространение получили коды Ландольта,

имеющие разрывы сверху, снизу, справа или слева, а также буквы алфавита различного углового размера (рис. 21).

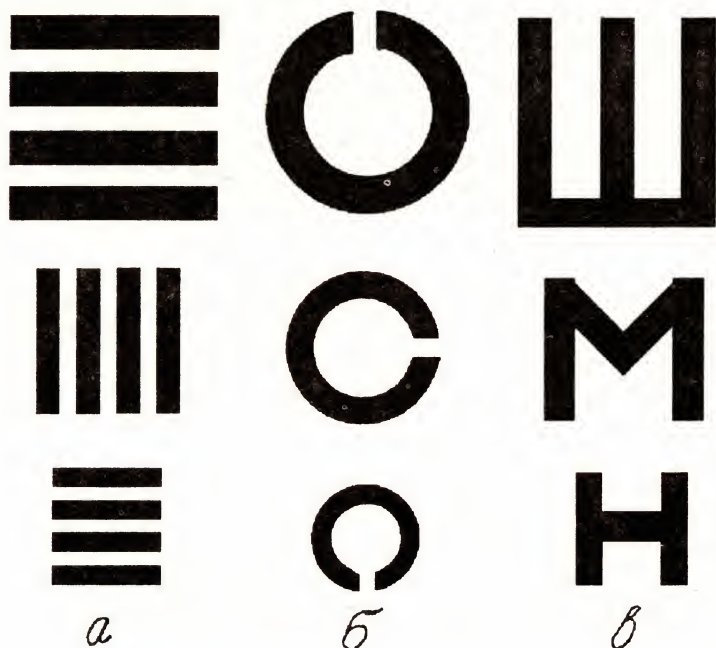


Рис. 21. Стандартные тесты, используемые для определения остроты зрения: а - решетки, б - кольца Ландольта, в - буквы

Человек с нормальным зрением воспринимает как отдельные две точки, видимые под углом в 1 угл.мин. ($1/60$ угл.град.). Именно эта величина и принимается за показатель нормальной (стандартной) остроты зрения. На практике же в качестве меры остроты зрения (*visus*, V) используется отношение двух расстояний - "стандартного" ($L_{cm.}$), с которого испытуемый должен видеть детали изображения под углом в 1 угл.мин., и реального (L), с которого он начинает различать эти детали: $V = L / L_{cm.}$ Таким образом, острота зрения выражается в относительных единицах от 0 до 1.

В норме острота зрения зависит от двух основных факторов - уровня освещенности и проекции изображения на сетчатку. И то и другое связано с тем, что в сетчатке глаза существует два типа фоторецепторов - палочки и колбочки. Палочки обладают большей

световой чувствительностью, т.е. срабатывают уже при слабых уровнях освещенности, однако они имеют довольно крупные рецептивные поля, что не позволяет достичь высокой остроты зрения; колбочки же наоборот - обладают низкой чувствительностью, но максимальной остротой зрения. Этим объясняется тот факт, что зависимость остроты зрения от освещенности имеет вид характерной S-образной кривой (рис. 22).

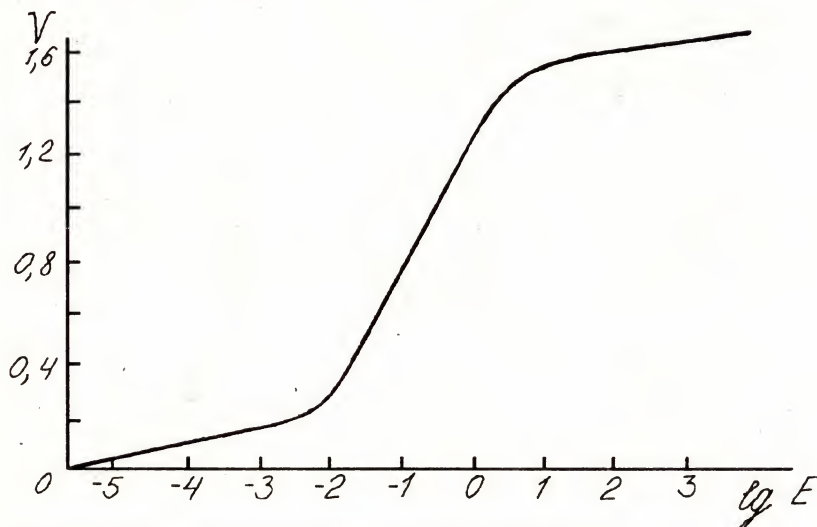


Рис. 22. Зависимость остроты зрения от уровня освещенности

Зависимость остроты зрения от проекции изображения на сетчатке объясняется тем, что центральная часть сетчатки (желтое пятно) представлена исключительно колбочками, поэтому острота зрения здесь максимальна. К периферии от желтого пятна количество колбочек уменьшается, а количество палочек возрастает, так что периферия сетчатки представлена исключительно палочками. Естественно поэтому, что острота зрения на периферии сетчатки будет минимальной (рис. 23).

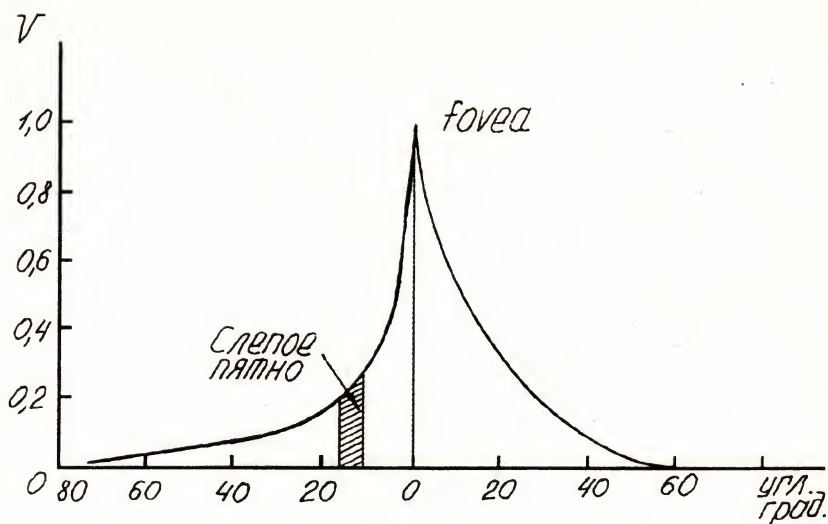


Рис. 23. Зависимость остроты зрения от проекции зрительного изображения на сетчатке

4.4.2. Поле зрения

Поле зрения называется область (участок) пространства, воспринимаемый глазом при неподвижно фиксированном взоре. Поле зрения каждого глаза имеет округлую, несколько неправильную, форму и слегка сужено с внутренней (назальной) стороны (рис.24). Для определения поля зрения используют прибор, называемый периметром. Суть процедуры состоит в том, что испытуемый фиксирует взглядом белую точку, находящуюся в середине оси прибора и одновременно определяет момент появления (исчезновения) другой точки, которую экспериментатор передвигает с помощью маркера в вертикальном, горизонтальном и других направлениях относительно глазной оси.

Показано, что границы поля зрения для белого и монохроматических цветов отличаются друг от друга (последние значительно уже (рис.24)). Это связано опять-таки с тем, что палочки сетчатки, расположенные на ее периферии, не воспринимают монохроматических цветов (напомним, что функцию цветового зрения выполняют колбочки).

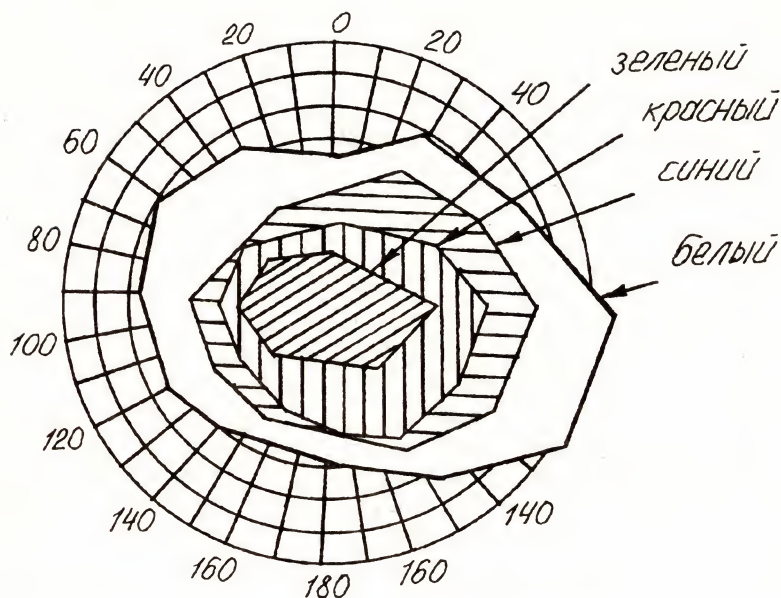


Рис. 24. Границы поля зрения правого глаза для белого и некоторых монохроматических цветов

Различные нарушения поля зрения (скотомы, гемианопсии, сужение поля зрения или выпадение его центральной части) имеют большое значение для диагностики ряда заболеваний, (причем не только заболеваний зрительной системы), поэтому исследования границ полей зрения имеют важное прикладное значение в офтальмологии и других областях медицины.

4.4.3. Восприятие формы объектов

Как было показано еще в начале XX в. гештальт-психологами, зрительное восприятие формы в значительной мере определяется наследственными механизмами. В 60-70-х годах американскими нейробиологами Хьюбелем и Визелем было обнаружено, что в зрительной коре существуют специализированные нейроны-детекторы, которые предназначены для выделения простейших параметров изображения (ориентации, направления движения и т.д.). Существование таких детекторов обеспечивает своего рода "каркас", который в течение жизни усложняется, обогащается жизненным опытом и обеспечивает восприятие конфигурации сложных зрительных изо-

бражений. Известно однако, что младенцы уже на второй неделе жизни чаще фиксируют взгляд на оформленных изображениях типа человеческого лица, нежели на абстрактных изображениях типа геометрических фигур.

У взрослого человека восприятие формы изображения складывается, по-видимому, из двух различных механизмов. С одной стороны, это - определение пространственных соотношений между деталями изображения (отношения "справа - слева", "сверху - снизу") и, в соответствии с этим, структурирование образа объекта. Этот механизм связан с функционированием заднетеменной ассоциативной коры и достаточно поздно формируется в процессе онтогенеза (известно, что дети дошкольного и младшего школьного возраста часто пишут R вместо Я, N вместо И и т.д.). Второй механизм, значительно больше связанный с врожденными, наследственными, факторами, это - способность к инвариантности, константности восприятия. Суть его заключается в способности субъекта воспринимать зрительные изображения независимо от поворотов, перемещений, размера, ракурса, уровня освещенности и т.д. Этот механизм связан, в основном, с развитием нижневисочной области коры, которая также усложняется и совершенствуется в течение жизни.

Таким образом, восприятие формы зрительного изображения основано как на генетических, врожденных, механизмах, так и в значительной мере определяется жизненным опытом.

4.4.4. Зрительное восприятие размера

Размер объектов воспринимается благодаря согласованной работе двух психофизиологических механизмов - оценки величины изображения объекта на сетчатке и оценки удаленности объекта от наблюдателя. Показано, что субъективная оценка одномерных объектов (длина и высота линий) связана с реальными (физическими) размерами приблизительно линейной функцией. Размер двумерных объектов (например, площадь геометрических фигур, как правило, недооценивается. Так, опыты по оценке площади круга обнаруживают степенную функцию $R = k \cdot S^n$ с показателем степени, равным 0,7. Еще больше занижается размер трехмерных фигур (например, объем шара).

Известно, что размер знакомых объектов, особенно находящихся на определенном расстоянии от наблюдателя, воспринимается и оценивается значительно точнее, чем незнакомых. Это позволяет признать большую роль жизненного опыта субъекта в зрительном восприятии размера.

4.4.5. Восприятие удаленности

Поскольку изображение любого объекта на сетчатке двумерно, то оценка третьего измерения (расстояния, удаленности, пространственной глубины) включает в себя дополнительные механизмы, в частности оценку соотношения глазных осей. Понятно, что чем удаленнее объект от наблюдателя, тем более параллельными являются глазные оси. С другой стороны, степень удаленности (особенно знакомых объектов) может оцениваться по величине его изображения на сетчатке.

Зависимость между физической удаленностью (расстоянием от наблюдателя до объекта) и ее субъективной оценкой, как правило, нелинейна. Для описания этой зависимости А.Жилинска предложил формулу следующего вида:

$$R_D = AD/(A + D),$$

где D - реальное расстояние, R_D - его субъективная оценка, A - максимальное (предельное) воспринимаемое расстояние для данного испытуемого в данных условиях эксперимента.

Исследования 70 - 80-х годов показали, что оптимальной функцией для описания субъективной оценки расстояния является степенная зависимость. При этом величина показателя степени функции может варьировать от 0,8 до 1,27 в зависимости от конкретных условий эксперимента (наличие ориентиров, оценка удаленности в замкнутом или открытом пространстве, угол возвышения (для оценки расстояния до летящих целей) и т.д. Существуют также данные о том, что субъективная оценка удаленности может зависеть и от субъективной установки субъекта (ориентация на видимую величину или на удаленность).

4.4.6. Восприятие движения

Восприятие направления движения практически не требует жизненного опыта и научения. Нейроны-детекторы направления движения врожденны, их существование генетически предопределено. Известно, что дети первого года (и даже первых месяцев жизни) способны достаточно адекватно проследивать взглядом движущиеся объекты. Исследование восприятия движения с помощью психофизических методик показало достаточную адекватность субъективной оценки реальному направлению движущегося объекта.

Пороги восприятия движения достаточно низки. Человек способен заметить движение точки, если она изменяет свое положение со скоростью 1 - 2 угл.мин. в секунду. Тем не менее величина порога обнаружения движения зависит от ряда факторов. Главный из них -

это наличие определенных ориентиров (точек отсчета). Так, в пустом неструктурированном поле порог восприятия движения будет значительно выше, нежели в структурированном. По-видимому, величина порога зависит и от направления движения объекта: мы легче замечаем движение объекта в горизонтальном, нежели в вертикальном направлении. Однако данные на этот счет несколько противоречивы.

Субъективная оценка скорости движения представляет собой степенную функцию реальной скорости: $R_v = k \cdot V^n$, причем величина показателя степени подвержена значительным индивидуальным вариациям - по некоторым данным, она может изменяться от 0,2 до 2,6 со средним значением около 1,2. При этом интересно, что в большинстве случаев для оценки скорости испытуемые используют внутренний эталон, величина которого составляет примерно 1,2 м/с = 4,3 км/ч, что соответствует средней скорости ходьбы человека.

Существуют некоторые психологические феномены, связанные с восприятием движения, в частности так называемый *стробоскопический эффект*. Он заключается в том, что если в поле зрения демонстрировать периодически появляющуюся точку, которая с каждым предъявлением закономерно меняет свою пространственную локализацию, то возникает четко выраженная иллюзия движения. Стоит напомнить, что с изучения стробоскопического эффекта началась история гештальт-психологии.

Завершая раздел по зрительному восприятию пространства, хотелось бы отметить, что восприятие пространства и пространственных соотношений наиболее стабильно, наиболее инвариантно, так как оно играет несомненно важную роль в жизни человека. Во-первых, зрительная система - это важнейший пространственный анализатор, во-вторых, адекватное отражение пространства является необходимым условием адекватного и целесообразного поведения и деятельности.

5. ПСИХОФИЗИКА СЛУХА

Слуховое восприятие является, пожалуй, вторым по значимости (после зрения) видом чувствительности. Так же как и зрение, это дистантное чувство, которое позволяет на значительном расстоянии воспринимать механические колебания упругой среды (воздуха), которые имеют биологическую или социальную значимость для человека, сигнализируя об определенных событиях и изменениях во внешней среде.

Слух играет не только первосигнальную, но и второсигнальную роль (восприятие речи) и, следовательно, является весьма важным звеном межличностной коммуникации.

Слуховое восприятие складывается из ряда взаимосвязанных механизмов восприятия звукового сигнала - его интенсивности, частоты, длительности, пространственной локализации и пр.

5.1. ВОСПРИЯТИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКА

Интенсивность (энергия) звуковых колебаний соответствует квадрату звукового давления: $I = k \cdot P^2$. В свою очередь, **звуковое давление** - это давление, оказываемое частицами колеблющейся среды на единицу площади поверхности (при условии, что эта поверхность перпендикулярна направлению движения частиц). Общепринятой единицей измерения звукового давления является ньютон на квадратный метр (Н/м²). Другой единицей звукового давления является дина на квадратный сантиметр (дин/см²), или микробар (мкбар). Соотношения между этими единицами следующие: $1 \text{ Н/м}^2 = 10 \text{ дин/см}^2 = 10 \text{ мкбар}$.

В норме слуховая система человека воспринимает звуковое давление от $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м² (давление, приблизительно соответствующее уровню абсолютного порога) до 20 Н/м² (порог неприятных ощущений). Оперировать с этими величинами не очень удобно, а потому на практике принято пользоваться не абсолютными, а относительными единицами - белами (Б), децибелами (дБ) и неперами (нп).

При использовании относительных единиц принято говорить не о звуковом давлении, а об **уровне звукового давления**. При этом за точку отсчета P_0 (0 дБ или 0 нп) принимается уровень **условного абсолютного порога**, соответствующий $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м². При использовании десятичных логарифмов уровень звукового давления (УЗД) вычисляется в децибелах: увеличение звукового давления в 10 раз соответствует возрастанию УЗД на 20 дБ; в 100 раз - на 40 дБ и т.д. При использовании натуральных логарифмов (по основанию e) УЗД вычисляется в неперах ($1 \text{ нп} \approx 8,67 \text{ дБ}$).

Уровень абсолютного порога восприятия звукового сигнала зависит от частоты звуковых колебаний. Эта зависимость ($P_0 = \phi(f)$), выраженная в графической форме, получила название **частотно-пороговой кривой** (ЧПК). Типичная ЧПК для человека с нормальным слухом изображена на рис. 25.

Можно видеть, что уровень порога минимален на средних частотах (максимальная слуховая чувствительность наблюдается в диапазоне частот от 1 до 5 кГц, в области же высоких и (в еще большей

степени) низких частот чувствительность уменьшается, т.е. уровень абсолютного порога повышается.

Кроме кривой изменения уровня абсолютного порога, можно построить кривую неприятных ощущений: $P_{\text{н}} = \phi(f)$, которая по своей форме несколько напоминает ЧПК, но имеет более уплощенный вид (рис. 25). Область между ЧПК и кривой порога неприятных ощущений получила название субъективного слухового пространства.

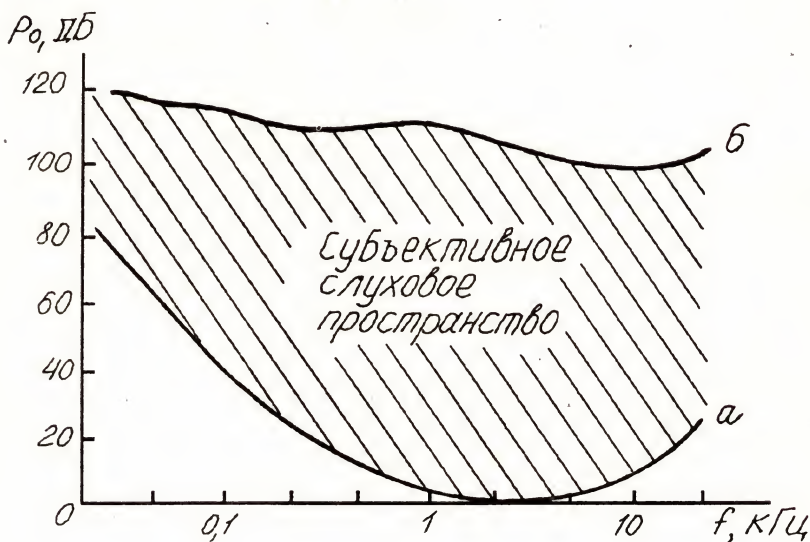


Рис. 25. Частотно-пороговая кривая (а), кривая неприятных ощущений (б) и субъективное слуховое пространство у человека с нормальным слухом

Дифференциальные пороги по интенсивности в первом приближении подчиняются правилу Вебера ($\Delta I/I = \text{const}$), однако в области низких интенсивностей звукового сигнала наблюдается отклонение от правила. Оно выражается (так же как и для зрительного восприятия) в увеличении порога (рис. 26). Кроме того, величины дифференциальных порогов в определенной степени зависят и от частоты звуковых колебаний (рис. 27). При этом интересно отметить, что правило Вебера лучше соблюдается в области средних частот, нежели в области высоких и низких.

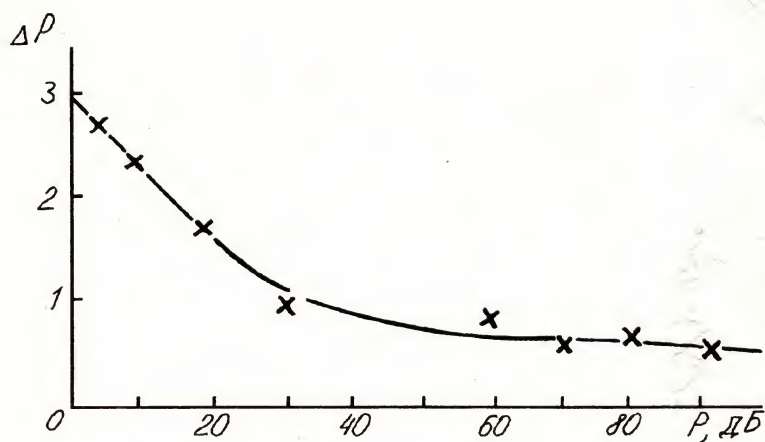


Рис.26. Зависимость дифференциального порога по громкости от интенсивности звукового сигнала (частота колебаний 1 кГц)

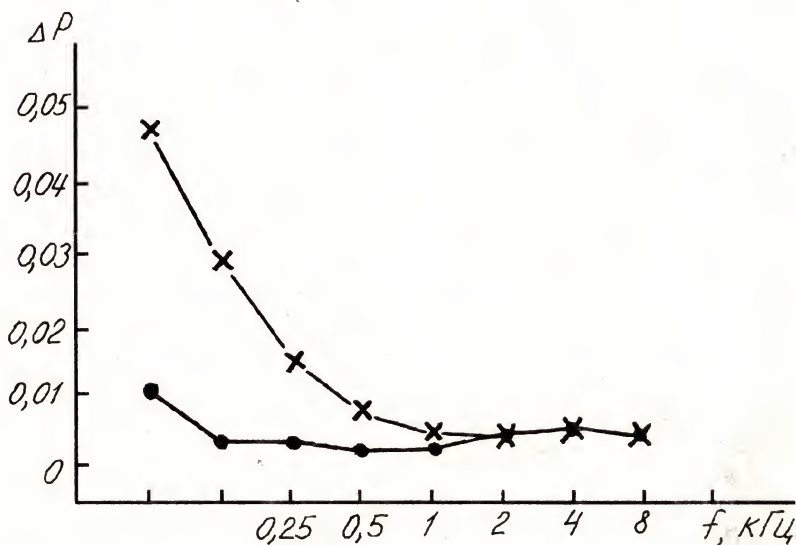


Рис.27. Зависимость дифференциального порога по громкости от частоты звуковых колебаний (по данным разных авторов). Уровень звукового давления 30 дБ над порогом

Восприятие громкости тонального звука, которое, как правило, измеряется по субъективным оценкам испытуемых при использовании разных методов шкалирования, обнаруживает степенную функцию Стивенса $R = k \cdot P^n$ с $n \approx 0,5$. Другими словами, субъективная оценка громкости пропорциональна квадратному корню звукового давления. В области низких значений P величина показателя степени возрастает, но не так значительно, как например, для восприятия яркости света. Незначительное повышение экспоненты имеет место также и при высоких интенсивностях (уровень звукового давления выше 90 дБ над порогом).

Известное влияние на оценку громкости оказывает и частота звуковых колебаний. При этом отмечено, что величина показателя степени функции Стивенса при использовании низкочастотных сигналов имеет тенденцию увеличиваться.

5.2. ВОСПРИЯТИЕ ВЫСОТЫ ТОНА

Слуховая система человека способна воспринимать звуковые колебания с частотой от 16 - 20 Гц до 20 кГц. Колебания с частотой ниже 16 Гц называются инфразвуками, а с частотой свыше 20 кГц - ультразвуками. С возрастом верхняя граница воспринимаемых частот сдвигается и диапазон слухового восприятия, соответственно, укорачивается. В еще большей степени слух на высокие частоты ухудшается у лиц, длительное время работающих с производственными шумами: верхняя граница воспринимаемого частотного диапазона может снижаться до 12 - 14 кГц, в то время как нижняя граница остается в пределах нормы.

Дифференциальные пороги по частоте подчиняются правилу Вебера только в области средних значений (от 500 Гц до 2 кГц), в области же низких и высоких частот дифференциальные пороги увеличиваются.

Субъективным аналогом частоты звуковых колебаний является **высота тонального звука**. Высота звука складывается как бы из двух составляющих - количественной и качественной. *Количественная составляющая* высоты тона - это такая характеристика, которая позволяет определить, что тон S_1 выше тона S_2 (или наоборот). При попытке использования методов шкалирования применительно к оценке высоты тона было показано, что психофизическая функция не соответствует ни степенной, ни логарифмической форме зависимости - она как бы занимает промежуточное между ними положение. Причиной отклонения от "классической" степенной функции, очевидно, является то, что высота тонального звука представляет собой "метатетический" (по классификации Стивенса) кон-

тинуум, т.к. может рассматриваться не только как количественная, но и как качественная характеристика (при изменении высоты меняется качество звука).

Качественная составляющая высоты тона меняется не монотонно, а циклически. Известно, что звуки, частоты которых находятся в соотношении 2:1, кажутся сходными (близкими по характеру звучания), как, например, одна и та же нота в разных октавах. Это явление получило название *феномена октавы*.

Таким образом, для того чтобы описать "субъективное пространство" высоты тонального звука, необходима модель, которая учитывала бы и качественную, и количественную составляющие. Такая модель, имеющая вид трехмерной, разворачивающейся в пространстве спирали, была предложена Шепардом в 1964 году и получила название *спирали Шепарда*. Каждый виток этой спирали соответствует одной октаве (человек воспринимает около 10 октав), а движение вдоль спирали соответствует изменению количественной составляющей высоты тона.

Феномен октавы имеет в своей природе физические и физиологические механизмы, связанные с разложением основной частоты звука в геометрической прогрессии на составляющие частоты (Фурье-разложение).

5.3. ВОСПРИЯТИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЗВУКА

Длительность звукового сигнала является одним из информативных признаков, определяющих его опознание и оценку биологической или социальной значимости. Известно, что еще И.М.Сеченов относил слуховую систему к анализаторам "временного чувства". Для человека роль слуха как анализатора времени особенно важна, поскольку членораздельная речь представляет собой не что иное как сложный звуковой сигнал, модулированный во времени по амплитуде, частоте и другим параметрам.

В качестве психофизического показателя различения длительностей звукового сигнала используют относительный дифференциальный порог временного различения ($\Delta T/T$). Показано, что в диапазоне длительностей порядка $1 \div 10$ с величина порога приблизительно соответствует 0,1, а в области более коротких длительностей имеет тенденцию повышаться (т.е. дифференциальная чувствительность ухудшается).

5.4. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЗВУКА

5.4.1. Локализация неподвижного источника звука

Локализация неподвижного источника предполагает определение координат этого источника в трехмерном пространстве, т.е. в горизонтальной и вертикальной плоскостях относительно головы наблюдателя, а также степени удаленности источника.

Механизм локализации источника звука в *горизонтальной плоскости* связан с физическими параметрами сигнала. При низкочастотных сигналах (до 1,5 кГц) длина волны звуковых колебаний больше межушного расстояния, равного в среднем 21 см. В этом случае локализация источника осуществляется благодаря разному времени прихода звуковой волны на каждое ухо (в зависимости от азимута). При частотах больше 3 кГц ($\lambda < 13$ см) длина волны меньше межушного расстояния и локализация осуществляется за счет разницы по интенсивности звука, которая создается благодаря экранирующему эффекту головы. В области же частот от 1,5 до 3 кГц ($\lambda \approx 13 \div 26$ см) происходит смена временного механизма локализации на механизм оценки интенсивности, а область перехода называется наименее благоприятной для локализации.

Кроме двух основных механизмов локализации, упомянутых выше, существует и третий, связанный с приходом звуковой волны в правое и левое ухо в разной фазе колебания. Этот механизм работает в области низких частот (до 600 Гц), где длина волны превышает 0,6 м.

В целом отмечается, что локализация источника звука в горизонтальной плоскости точнее, чем в вертикальной.

Оценка удаленности неподвижного источника звука осуществляется с помощью разных механизмов. Первый - это оценка интенсивности сигнала, которая уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Особенно это касается знакомых (стандартных) источников звука при расстояниях до них от 3 до 15 м. При более близких (< 3 м) и далеких (> 15 м) расстояниях включаются механизмы, связанные со спектральным составом звуковой волны. При близких расстояниях звук искажается за счет головы и ушей, а при больших - за счет разной степени затухания компонентов с различной длиной волны.

Одним из факторов, существенно облегчающих оценку удаленности, является реверберация звукового сигнала от отражающих поверхностей, т.е. восприятие отраженного звука.

5.4.2. Локализация движущегося источника звука

Локализация движущегося звука также включает в себя целый ряд психофизиологических механизмов. При изменении азимута источника звука в горизонтальной или вертикальной плоскости меняется интервал времени, соответствующий разнице прихода звуковой волны в правое и левое ухо. При удалении или приближении источника звука по отношению к наблюдателю меняется, во-первых, интенсивность звучания, во-вторых, его спектральный состав: приближение источника дает иллюзию увеличения высоты основного звука, а удаление, наоборот, понижение высоты тона (так называемый *эффект Доплера*). Эффект значительно лучше выражен, когда наблюдатель имеет дело со звуком, близким к тональному, или узкополосным шумом, нежели при действии широкополосных шумов.

6. ПСИХОФИЗИКА КОЖНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Выражение "кожная чувствительность" - несомненно, правильное выражение. Однако, когда мы употребляем понятие "кожное чувство", мы, скорее всего, грешим против истины, поскольку существует по крайней мере три различных вида кожной чувствительности - тактильная, температурная и болевая. Каждая из них связана со специализированными рецепторами кожи, избирательно реагирующими на механические, термические и болевые (ноцицептивные) воздействия. Восприятие каждой из этих модальностей имеет свои особенности, поэтому имеет смысл рассмотреть отдельно каждый из вышеупомянутых видов кожной чувствительности.

6.1. ТАКТИЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Тактильная чувствительность объединяет четыре качества ощущения - *прикосновение, давление, вибрацию и щекотание*. Исследование ощущения прикосновения обычно включает в себя определение абсолютных порогов чувствительности и пространственных порогов различения.

Абсолютные пороги ощущения прикосновения чаще всего определяются с помощью стандартного набора волосков Фрея (нейлоновые волоски или щетинки разного диаметра, градуированные в миллиньютонх в соответствии с силой, вызывающей сгибание

волоска). Необходимо учесть, что ощущение прикосновения можно вызвать только в определенных (тактильных) точках кожи. Участки кожи с большим количеством тактильных точек - это кончики пальцев, губы, кончик носа и т.д. На плечах, бедрах, спине и поверхности живота тактильные точки особенно редки.

В современных стимуляторах используют сменные стержни, позволяющие стимулировать разные по площади участки кожи.

Величины порогов на разных участках кожи существенно отличаются друг от друга: они значительно ниже на кончиках пальцев, выше - в более проксимальных участках кисти, стопы, плеча и предплечья и максимальны на коже спины, живота и груди.

Субъективная оценка интенсивности ощущения прикосновения и давления описывается степенной функцией Стивенса с показателем степени чуть большим единицы:

$$R = k \cdot S^{1,1}, \text{ или } \log R = 1,1 \log S + C.$$

Другими словами, субъективная шкала восприятия тактильного раздражителя почти не отличается от физической шкалы. В то же время описана значительная индивидуальная вариабельность, и величина экспоненты может варьировать от 0,36 до 1,72.

Пространственные пороги различения двух тактильных раздражителей исследуются с помощью эстезиометра (циркуля Вебера), который имеет затупленные ножки (во избежание воздействия на болевые рецепторы) и измерительную шкалу, градуированную в миллиметрах и показывающую расстояние между ними. Экспериментатор касается определенного участка кожи ножками циркуля, периодически сдвигая или раздвигая их, а испытуемый должен давать отчет о том, ощущает ли он одно или два прикосновения. По сути эта процедура аналогична исследованию остроты зрения, так как здесь также измеряется предельная разрешающая пространственная способность.

Различают **пороги одновременного (ОПР) и последовательного (ППР) пространственного различения** (в зависимости от того, раздражаются ли близлежащие точки кожной поверхности одновременно или последовательно). При этом ППР на аналогичных участках кожи всегда в 3-5 раз меньше, чем ОПР. Причина этого, по всей видимости, связана с физиологическими механизмами взаимодействия (возможно, взаимного торможения) рядом расположенных кожных рецептивных полей.

С другой стороны, и ОПР, и ППР варьируют в значительной степени на разных участках тела. На наиболее чувствительных, наиболее информативных участках (кончики пальцев, кончик носа, губы) величина пространственного порога соответствует 2 - 5 мм, в то время как на поверхности шеи и спины 50 - 70 мм.

Показано, что величина абсолютных порогов прикосновения и пространственная разрешающая способность на одних и тех же участках кожи достаточно хорошо коррелируют между собой, что указывает на неодинаковую информационную значимость разных частей тела у человека.

Вибрационная чувствительность у человека исследуется достаточно редко - в первую очередь, в плане клинической диагностики вибрационной болезни. Чувству вибрации мы обязаны существованием в коже специализированных быстроадаптирующихся рецепторов - телец Пачини, которые не реагируют на длительные раздражения, а только на кратковременные, прерывистые. В клинике используется иногда методика КЧСТ (критическая частота слияния толчков), которая заключается в постепенном увеличении частоты вибрационных стимулов до тех пор, пока ощущение отдельных толчков не переходит в специфическое ощущение шекочущего постоянного воздействия. В норме - это частота 150-300 Гц. Резкое изменение порогов КЧСТ может наблюдаться при вибрационной болезни, контузиях мозга и т.д.

Необходимо отметить также, что виброрецепторы являются наиболее чувствительными среди всех кожных рецепторов - их пороги приблизительно на порядок ниже, чем у рецепторов прикосновения.

6.2. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Температурное ощущение формируется из двух, относительно независимых друг от друга, качественно различающихся ощущений - тепла и холода. В том, что существуют два отдельных типа рецепторов - тепловые и холодные - можно убедиться в достаточно простом опыте. На тыльной стороне кисти (обычно на участке кожи между первой и второй пястными костями) рисуют квадратик размером 1 x 1 см. С помощью двух щупов из медной проволоки (один охлаждается во льду, другой нагрет до 45 - 50°C) можно, последовательно прикасаясь к разным точкам кожи внутри этого квадратика, "картировать" наличие тепловых и холодных точек. Первых, как правило, в 7 - 10 раз меньше, чем вторых.

Различают статические и динамические ощущения температуры.

Статические ощущения касаются тех условий, когда уровень температуры не меняется в течение определенного времени. При этом субъективное ощущение тепла или холода может со временем меняться за счет температурной адаптации. Температурный диапазон, в пределах которого происходит полная адаптация и исчезновение каких-либо температурных ощущений, называется *нейтральным диапазоном* или *"зоной комфорта"*. Выше и ниже этого ней-

трального диапазона постоянные ощущения тепла и холода сохраняются даже тогда, когда температура кожи длительно поддерживается на одном уровне. Ширина "зоны комфорта" зависит от площади стимулируемой поверхности кожи: чем меньше эта поверхность, тем шире зона полной адаптации - при раздражении очень маленького участка кожи она может достигать 8 - 10°C (от 28 - 30° до 36 - 38°C). При тотальном же температурном воздействии нейтральный диапазон сужается до 1 - 2°C.

Следует отметить, что температурные рецепторы кожи реагируют, строго говоря, не на температуру окружающей среды, а на внутрикожную температуру, которая составляет в среднем 33-35°C.

При сильном охлаждении (ниже 17°C) и нагревании кожи (выше 43 - 44°C) ощущения тепла и холода становятся болезненными: в этих случаях, кроме температурных, возбуждаются и болевые рецепторы кожи.

Динамические температурные ощущения возникают при относительно быстром переходе от одного уровня температуры к другому. При этом качество ощущения в значительной степени зависит от исходного уровня температуры. Хорошо известен опыт Вебера с тремя сосудами, один из которых наполнен холодной водой, второй - теплой и третий - горячей. Если погрузить указательный палец одной руки в холодную воду, а другой - в горячую, поддержать их там в течение 2-3 минут, а затем оба пальца перенести в сосуд с теплой водой, то ощущения, возникающие при этом, для правой и левой руки будут различаться: один палец будет ощущать тепло, другой - холод.

Разностные пороги ощущения тепла и холода могут варьировать в широких пределах - от 0,1 до 1°. При этом большое значение имеет исходный уровень температуры. При температурах ниже нейтральной уменьшаются разностные пороги к дальнейшему снижению температуры, т.е. рецепторы становятся более чувствительными к холоду, и наоборот: если исходная температура выше нейтральной, уменьшаются разностные пороги на повышение, т.е. становятся более чувствительными тепловые рецепторы.

Субъективная оценка тепла и холода, которую испытуемые могут давать либо в градусах, либо в относительных (условных) единицах, подчиняется степенной функции Стивенса $R_T = k \cdot T^n$, где показатели степени для оценки тепла и холода существенно отличаются друг от друга (соответственно 1,7 и 1,0). Это можно объяснить двумя причинами. Во-первых, холодовых рецепторов больше, чем тепловых, и следовательно, оценка холода осуществляется в более оптимальном режиме (субъективная шкала соответствует физической шкале температуры). В то же время оценка тепла совершенно

неадекватна реальному изменению температуры. Во-вторых, физический диапазон температур восприятия тепла (от "точки комфорта" до ощущения жжения) значительно уже, чем диапазон восприятия холода. Таким образом, различия показателей степени субъективной оценки тепла и холода можно, по-видимому, связать и с "эффектом диапазона" (см. 3).

Существуют особые виды температурных ощущений; некоторые из них до сих пор не имеют четкого физиологического объяснения. Так, известны *следовые ощущения* тепла и холода. Если нагреть или охладить какой-либо участок кожи, а затем устранить термический раздражитель, то ощущение тепла или холода остается даже тогда, когда температура кожи возвращается к исходному уровню. Следовые ощущения могут быть связаны либо с инерционностью терморецепторов, которые продолжают импульсировать спустя некоторое время после прекращения воздействия, либо имеют в своей основе центральные механизмы.

Парадоксальное ощущение холода, которое возникает в результате быстрого нагревания тела (например, при погружении в горячую ванну), по-видимому, связано с кратковременным возбуждением холодовых рецепторов, причина которого не совсем понятна.

Ощущение жжения, которое возникает при температуре кожи выше 45°C, по-видимому, следует рассматривать не как разновидность тепла, а как разновидность боли. Очевидно, при этих температурах вовлекаются в работу, кроме тепловых, и специфические болевые нервные окончания.

6.3. БОЛЕВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Болевая чувствительность является, по-видимому, одним из самых древних видов чувствительности. Боль - это сигнал опасности, это предупреждение о том, что в организме имеют место какие-то неполадки, что субъект должен принять необходимые меры по устранению источника боли (или отстранению от этого источника) и т.д.

Долгое время дискутировался вопрос о том, существуют ли специализированные болевые рецепторы, которые избирательно реагируют только на соответствующее болевое (ноцицептивное) воздействие. Согласно теории специфичности рецепторов, предложенной в конце XIX в. Бликсом и Фреем, такими рецепторами являются свободные нервные окончания, лишенные каких-либо вспомогательных структур, которые обладают высоким порогом и могут возбуждаться при воздействии только достаточно сильных раздражителей. Согласно "теории паттернов" (образов), предложенной в 20-е годы Нейфом, любой рецептор при достаточно сильной

стимуляции может стать болевым. При этом его активность изменяется вполне определенным образом - он начинает генерировать ритмические низкоамплитудные "болевые" импульсы, которые вызывают в высших отделах мозга ощущение боли. Гед в 1920 г. ввел понятие о двух видах боли - *эпикритической* и *протопатической*. Первая характеризуется острым, локальным, кратковременным болевым ощущением, вторая - неопределенным "тянущим" чувством, не имеющим четкой локализации.

Очевидно, справедливы отдельные положения и той, и другой, и третьей теорий. В самом деле, при воздействии чрезмерно сильного раздражителя любой рецептор может стать "болевым". В то же время свободные нервные окончания (а также нервные окончания волосяных фолликулов) являются специализированными болевыми рецепторами, т.к. способны отвечать только на очень сильные воздействия. Наличие же эпикритической и протопатической боли связано с проведением болевых импульсов по разным нервным путям: в первом случае по лемнисковому (пути Голля и Бурдаха, система медиальной петли), во втором - по спино-таламическому тракту. Более подробно эти вопросы обсуждаются в курсе сенсорной физиологии.

Различают несколько разновидностей болевого ощущения. Если боль имеет кожное происхождение, ее называют *поверхностной*; если же ее источник находится в мышцах, костях, суставах, связках, соединительной ткани, она называется *глубокой болью*. Особое место занимают *висцеральные боли*, связанные с патологией внутренних органов. Это, пожалуй, наиболее распространенный вид боли, причиняющий человеку много мук и страданий.

С психофизической точки зрения боль изучена значительно хуже, чем другие виды чувствительности. Это связано, прежде всего, с методическими трудностями: не так много добровольцев соглашается принять участие в подобных экспериментах в качестве испытуемых.

С другой стороны, перед экспериментатором встают проблемы этического плана - насколько гуманно подвергать испытуемого болевому воздействию, не нанесет ли это ущерб его здоровью и психике и т.д.

Субъективная оценка болевого ощущения впервые была исследована в лаборатории С.Стивенса. При этом в качестве раздражителя использовалось электрическое воздействие на кончики пальцев. Было показано, что ощущение боли возрастает по степенному закону с чрезвычайно высоким показателем степени (около 3,5). Другими словами, увеличение силы электрокожного воздействия в 2 раза увеличивает ощущение примерно в 10 раз, а увеличение стимула в 3 раза соответствует возрастанию болевого ощущения в 50 раз.

Разностные пороги болевого ощущения достаточно велики. Это свидетельствует о том, что болевая чувствительность довольно груба и мало дифференцирована. В то же время, поскольку диапазон восприятия боли достаточно узок, в нем укладывается всего 12 - 15 разностных порогов. Другими словами, между едва заметным болевым ощущением и уровнем нестерпимой боли насчитывается всего 12 - 15 различных градаций.

Существует ли **адаптация** к боли? Ответ на этот вопрос неоднозначен. Перефразируя слова известного полярного исследователя, можно сказать, что привыкнуть к боли нельзя, ее можно только терпеть. В то же время существуют центральные адаптационные механизмы (если говорить точнее, механизмы, снижающие болевые ощущения). Об этом свидетельствует практика гипнотерапии, внушения и самовнушения. Кроме того, в центральной нервной системе обнаружена целая группа нейропептидов (эндорфины), которые являются естественными болеутоляющими веществами, выделяющимися, когда организм находится в критической ситуации.

7. ПСИХОФИЗИКА КИНЕСТЕТИЧЕСКОЙ И ВЕСТИБУЛЯРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Кинестетическое и вестибулярное чувства имеют много общего. Их назначение - определять положение и изменение положения тела в пространстве (относительно гравитационного поля Земли), положение частей тела относительно друг друга (углы поворота суставов, степень напряжения и растяжения мышц, сухожилий и т.д.). Рецепторы и проводящие пути кинестетической и вестибулярной чувствительности, несмотря на то, что они структурно обособлены друг от друга, формируют единую функциональную систему - систему проприорецепции. Поэтому неудивительно, что системы кинестетического и вестибулярного чувства в психофизическом аспекте имеют достаточно много общих закономерностей.

7.1. КИНЕСТЕТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Кинестетическое чувство складывается из двух более или менее обособленных видов чувствительности. Первое связано с **ощущением тяжести** при противодействии гравитационному полю Земли, которое возникает при поднятии или перемещении различных грузов и связанных с этим напряжением скелетных мышц и растяжением соответствующих связок и сухожилий. Второе - **пространственная ки-**

нестезия - обеспечивает ощущение и оценку взаимного расположения конечностей, головы, туловища, т.е. создает субъективно воспринимаемую "схему тела" по отношению к окружающему пространству.

7.1.1. Восприятие тяжести груза

Это один из видов чувствительности, который впервые стал изучаться психологами и психофизиками более полутора столетий назад (см. 1.1). Именно по отношению к этой сенсорной модальности Э.Вебер вывел известное правило постоянства *дифференциальных порогов* ($\Delta P/P = const$). Дальнейшие исследования показали, что правило Вебера (как и для стимулов других модальностей) хорошо выполняется в диапазоне средних грузов (минимальный дифференциальный порог соответствует грузам массой от 100 до 600 г), а в области больших и малых грузов величина порога возрастает. Следует отметить также, что величина дифференциального порога существенно зависит от способа подъема груза, т.е. от того, какие группы мышц принимают в этом участие. В среднем, как было установлено в свое время Вебером, величина дифференциального порога восприятия тяжести равна 0,03.

Абсолютные пороги восприятия тяжести груза не имеют серьезного методологического значения и, кроме того, они трудноопределимы. В самом деле, если положить на ладонь испытуемого груз весом в 0,1 г, то он почувствует только прикосновение к ладони, но не тяжесть. Если постепенно наращивать массу этого груза, то ощущение прикосновения переходит в ощущение давления на кожу. Более точно определить абсолютный порог восприятия тяжести можно подвешивая разные грузы к бечевке, привязанной к указательному пальцу. В этом случае величина порога (едва заметного ощущения тяжести) обычно составляет 5 - 10 граммов.

Верхний порог восприятия тяжести соответствует тому максимальному грузу, который субъект в состоянии поднять. Понятно, что он зависит от развития скелетных мышц и степени физического развития и в среднем составляет 50 - 100 кг.

Субъективная оценка тяжести описывается степенной функцией $R = k \cdot m^n$ с экспонентой, равной $1,2 \div 1,3$. Обращает на себя внимание то, что величина показателя степени больше единицы, т.е. субъективная шкала тяжести шире физической. В то же время величина экспоненты зависит от разнообразных факторов - способа поднятия груза, диапазона предъявляемых грузов, характера оценок (в граммах или условных единицах), положения стандарта на физической шкале и т. д.

Достаточно высока индивидуальная вариабельность; в частности, показано, что женщины дают более точную и более адекватную оценку тяжести по сравнению с мужчинами.

Среди разнообразных феноменов восприятия тяжести наиболее известна иллюзия Шарпантье (иллюзия размера - веса, size - weight illusion). Суть ее состоит в том, что из двух объектов одинакового веса, но разных по величине, меньший по размеру воспринимается как более тяжелый. Очевидно, в основе иллюзии лежит жизненный опыт субъекта и формирующаяся у него установка на то, что более крупные объекты, как правило, являются более тяжелыми. Иллюзия же возникает в результате рассогласования этой установки с реальным ощущением тяжести. То, что иллюзия Шарпантье не является врожденной, доказывается отсутствием ее у детей дошкольного возраста. Иллюзия формируется начиная с 7-8-летнего возраста, а к 10-12 годам она становится выраженной так же хорошо, как и у взрослых.

Близким к механизму восприятия тяжести является *восприятие собственного мышечного усилия*. Если испытуемому предложить сжимать ручной динамометр с определенным усилием и давать численную оценку величины этого усилия, то оценка будет изменяться в соответствии со степенным законом (величина экспоненты $1,4 \pm 1,7$). Как уже отмечалось (см. 3.2), эта своеобразная модальность послужила в качестве эталона для шкалирования стимулов других сенсорных модальностей.

7.1.2. Пространственная кинестезия

Этот вид чувствительности состоит в способности субъекта устанавливать или оценивать (без зрительного контроля) положение конечности, степень ее сгибания-разгибания в том или ином суставе и т.д. Для исследования пространственной кинестезии используются различные модификации кинематометров, наибольшее распространение из которых получил кинематометр Жуковского. Показано, что оценка положения конечности, как правило, адекватна ее реальному положению (степенная зависимость с показателем, близким к единице). При этом установлено, что оценка положения при активном движении в суставе (метод установки) значительно точнее, чем при его пассивном перемещении (метод оценки).

7.2. ВЕСТИБУЛЯРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Рецепторы вестибулярного аппарата дают информацию о положении тела в гравитационном поле Земли, а также о перемещении тела в пространстве (угловое и линейное ускорение). Доказано, что за линейное ускорение (движение вверх-вниз, вперед - назад) ответственные рецепторы преддверия лабиринта, формирующие отолитовый аппарат, а за угловое ускорение (вращение, повороты головы, наклон туловища) - волосковые клетки полукружных каналов.

Абсолютные пороги вестибулярной чувствительности чрезвычайно низки. Если выражать их в общепринятых единицах g (ускорение свободного падения, $1g = 9,8 \text{ м/с}^2$), то для линейного ускорения порог в среднем будет составлять $7 \cdot 10^{-2}$, а для углового - $3 \cdot 10^{-4}g$.

Показано существование *адаптации* к линейному и угловому ускорению, причем скорость и выраженность этой адаптации зависят от абсолютных значений действующего на организм ускорения.

Субъективная оценка как линейного, так и углового ускорения в первом приближении описывается степенной функцией с показателем около 1,4. Следует обратить внимание на то, что величины экспонент для оценки мышечного усилия и вестибулярной чувствительности практически совпадают.

Кроме теоретического значения, исследование основных психофизических закономерностей вестибулярной чувствительности играет и большую практическую роль. В первую очередь это касается проблемы профессиональной пригодности к таким видам деятельности, которые предъявляют повышенные требования к вестибулярной чувствительности (летчики, моряки, космонавты). Понятно, что люди с повышенной чувствительностью вестибулярной системы плохо переносят укачивание, вращение, состояние невесомости и вряд ли могут считаться серьезными претендентами на эти профессии. Второй аспект изучения вестибулярной чувствительности - клинико-диагностический (выявление вестибулярных, вестибуло-мозжечковых и других поражений мозга при синдроме Меньера и других неврологических заболеваниях.).

На сегодняшний день разработано достаточно много методов определения вестибулярной чувствительности, начиная с самых простых (пальце-носовая проба, проба Ромберга, вращение в кресле Барани) и кончая использованием современных тренажеров, сурдокамер и пр.

Достаточно много внимания уделяется вопросу тренировки вестибулярной системы, повышения ее устойчивости и сохранения работоспособности субъекта в экспериментальных ситуациях. Прак-

тика подготовки летчиков и космонавтов в России, США и других странах показывает, что подбором специальных методик можно добиться достаточно больших успехов в этом направлении.

8. ПСИХОФИЗИКА ВКУСА И ОБОНЯНИЯ

Вкусовую и обонятельную сенсорные системы объединяет то, что обе они являются системами химического чувства, т.е. адекватными раздражителями для них являются определенные химические вещества, обладающие некоторым родством к вкусовым и обонятельным рецепторам ввиду особенностей их химического строения. Поэтому неудивительно, что вкусовая и обонятельная чувствительность в психофизическом плане имеют ряд сходных черт и характеристик. Особенностью вкусовой и обонятельной чувствительности является также то, что обе они включают в себя разнообразные субъективные качества вкусовых и запаховых ощущений.

8.1. ВКУСОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

8.1.1. Психофизические характеристики вкусовой чувствительности

Основные характеристики вкусовой чувствительности, которые можно исследовать психофизическими методами - это значения абсолютных, разностных и дифференциальных порогов, субъективные шкалы вкусового ощущения, явления адаптации и вкусового контраста. Особую проблему представляет классификация вкусовых качеств и связанные с ней закономерности вкусового восприятия.

Абсолютные пороги вкусовой чувствительности соответствуют той минимальной концентрации химического вещества, которая вызывает едва заметное вкусовое ощущение. Абсолютные пороги для разных вкусовых веществ могут различаться в весьма значительных пределах - на несколько порядков. Так, при увлажнении тестирующим раствором всей ротовой полости абсолютный порог для сахарозы составляет 10^{-2} моля на литр раствора, для NaCl - $5 \cdot 10^{-2}$, для соляной кислоты - $7 \cdot 10^{-4}$, для солянокислого хинина около 10^{-7} моль/л и т.д. Как правило, пороги обнаружения горьких веществ значительно ниже, чем сладких, кислых и соленых.

При нанесении капель раствора вкусового вещества на разные участки языка обнаруживается неодинаковая чувствительность к разным вкусовым качествам. Показано, что к горькому наиболее

чувствителен корень языка, к сладкому - кончик, к кислому - края, а к соленому - кончик и края языка.

Имеется достаточно сложная зависимость между уровнем абсолютного порога и температурой тестирующего раствора. Для каждого вкусового вещества можно зафиксировать определенный температурный оптимум, при котором уровень порога минимален.

Помимо всего сказанного, величина абсолютного вкусового порога зависит от индивидуальных особенностей субъекта, функционального состояния организма в момент исследования, а также от сиюминутной потребности организма в данном веществе. Показано, в частности, что лишение человека на несколько дней хлористого натрия (бессолевая диета) снижает пороги обнаружения NaCl в десятки раз.

Разностные (дифференциальные) пороги вкусового ощущения - это величина едва ощутимой разницы в восприятии одного и того же вкусового раздражителя при переходе от одной концентрации к другой. Разностный порог может быть выражен в единицах концентрации.

Относительный дифференциальный порог есть отношение разностного порога к исходной концентрации (или к среднему значению двух сравниваемых концентраций). Выражается в относительных единицах.

Величина разностного и дифференциального порогов, так же как и абсолютная вкусовая чувствительность, зависит от многих факторов, в частности от области приложения вкусового вещества. Так же как для стимулов других сенсорных модальностей, в области средних значений раздражителя (в данном случае - в диапазоне средних для данного вещества концентраций) соблюдается правило Вебера $\Delta C/C = const$, в области же низких и высоких концентраций дифференциальный порог увеличивается. В среднем величина дифференциального порога вкусовой чувствительности у человека составляет $0,1 \div 0,3$, т.е. значительно выше, чем у большинства других сенсорных модальностей.

Субъективные шкалы оценки интенсивности вкусового ощущения в первом приближении описываются степенной функцией Стивенса, однако величина показателя степени варьирует в широких пределах (по данным разных авторов - от 0,3 до 1,9). В первую очередь она зависит от вида вкусового вещества, однако даже для одного и того же химического раздражителя она может иметь значительный индивидуальный разброс. Так, для NaCl индивидуальные вариации показателя степени составляют $0,63 \div 1,56$, для $MgCl_2$ - $0,50 \div 1,60$, для Na_2SO_4 - $0,48 \div 1,42$ и т.д. Таким образом, говорить о каких-либо

средних величинах показателей степени (даже по отношению к одному и тому же веществу), по-видимому, не имеет смысла.

Кроме субъективных шкал интенсивности вкусовых ощущений иногда конструируют так называемые *гедонические* (или *гедонистические*) *шкалы*, которые отражают степень предпочтения или отвергания тех или иных веществ. Суть эксперимента обычно состоит в следующем. Испытуемому предлагают растворы разных вкусовых веществ в разных концентрациях, которые он должен оценивать по степени "приятности" или "неприятности". Шкала оценок чаще задается от -10 (крайне неприятный) до +10 (исключительно приятный вкус). Гедонические кривые для разных вкусовых веществ не всегда являются монотонными и степень предпочтения того или иного вещества в значительной степени зависит от его концентрации.

Вкусовая адаптация проявляется в повышении абсолютного порога и снижении интенсивности вкусового ощущения при длительном действии раздражителя. Выраженность адаптации и ее временные характеристики зависят от вида и концентрации вкусового вещества. Так, адаптация к сладким и соленым веществам происходит быстрее, чем к горьким и кислым.

Среди характеристик вкусовой чувствительности особое место занимает **перекрестная адаптация**. Под перекрестной адаптацией понимают влияние одного вкусового вещества на пороги восприятия другого. Это явление весьма сложно и неоднозначно. Так, показано, что любая кислота снижает чувствительность ко всем другим кислотам; для сладких и горьких веществ такой закономерности не наблюдается. Для солей перекрестная адаптация отмечается только в тех случаях, когда они близки друг к другу по своему вкусовому качеству.

Вкусовой контраст - явление, в принципе, противоположное вкусовой адаптации. Оно заключается в том, что одно вкусовое вещество может повышать чувствительность к другому. В психофизике вкусовой контраст можно исследовать так же, как и вкусовую адаптацию - по изменению абсолютных порогов чувствительности и временной динамике этого изменения.

При исследовании *вкуса смесей различных вкусовых веществ* наблюдаются довольно сложные взаимоотношения, которые могут проявляться как в виде перекрестной адаптации, так и в виде вкусового контраста, что обусловлено химической спецификой компонентов, входящих в состав смеси.

8.1.2. Проблема вкусовых качеств

Проблема существования основных вкусовых качеств дискутируется, по меньшей мере, два с половиной тысячелетия. Первой дошедшей до нас классификацией вкусовых качеств является *классификация Аристотеля*, который выделял 8 основных качеств: сладкое, горькое, маслянистое, соленое, острое, терпкое, вяжущее и кислое.

Карл Линней, который классифицировал не только животных, растения и минералы, но и многое другое, предложил 9 основных вкусов: влажный, сухой, кислый, горький, жирный, вяжущий, сладкий, слизистый и соленый.

М.В.Ломоносов сократил число основных вкусов до пяти: сладкий (вкус меда), горький (вкус хины), кислый (вкус клюквы), острый (вкус редьки) и соленый (вкус поваренной соли).

Только в 1824 году французский химик *Шеврель* установил разницу между "ощущением языка", вкусом и запахом, т.е. по сути дела провел разграничение между собственно вкусовыми качествами и ощущениями, которые формируются за счет обонятельных рецепторов и механорецепторов языка. Таким образом, число основных вкусовых качеств было минимизировано и доведено до четырех (сладкое, кислое, горькое и соленое). Тем не менее некоторые исследователи не согласны с концепцией четырех основных качеств. Так, *Х.Альтнер* выделяет два дополнительных качества - щелочной и металлический вкус. *Икеда* выделил в отдельное вкусовое качество вкус глутаминовой кислоты.

Р.Эрикссон, анализируя историю изучения вкусового восприятия, пришел к выводу, что теория четырех основных вкусовых качеств никогда не была четко обоснована.

Тем не менее, концепция четырех основных вкусовых качеств является наиболее популярной. В 1916 году *Хеннинг* предложил психофизическую модель, которая описывает "субъективное пространство вкуса" в трехмерном евклидовом пространстве. Модель имеет вид правильного тетраэдра ("пирамида вкуса"), на вершинах которой располагаются "чистые" вкусы (горький, кислый, сладкий и соленый), а вкусы всех существующих в природе вкусовых веществ могут быть размещены на ребрах или гранях этой пирамиды. Другими словами, любое вкусовое ощущение можно получить смешением двух, максимум - трех "чистых" вкусов (рис.28, а). Относительные же расстояния точек от вершин пирамиды соответствуют относительному вкладу того или иного вкусового вещества в формирование целостного вкусового ощущения.

В 1971 году Шиффман и Эриксон попытались проверить справедливость модели Хеннинга экспериментально. При этом использовался метод неметрического шкалирования: испытуемые оценивали степень сходства и различия между растворами двух вкусовых веществ, предъявляемых последовательно друг за другом.

Компьютерная обработка большого числа результатов позволила воссоздать модель Хеннинга, но с некоторыми существенными поправками. Во-первых, оказалось, что полученная трехмерная фигура асимметрична и не имеет вид тетраэдра: расстояние между сладким и горьким вкусом оказалось значительно больше, чем между кислым и соленым и т.д. Во-вторых, вкус некоторых химических веществ (например, CaCl_2) не укладывался на поверхности пирамиды, так что для них пришлось искать место внутри нее.

На сегодняшний день существует ряд хитроумных теорий, которые пытаются найти определенное соответствие между вкусом вещества и особенностями его химического строения. Однако это не предмет психофизики, а комплексная проблема, которая решается совместными усилиями биохимиков, биофизиков, специалистов в области молекулярной биологии и т.д.

8.2. ОБОНЯНИЕ

Основное назначение обонятельной системы - информировать организм о присутствии в окружающей среде определенных химических соединений (пахучих веществ, или одорантов), которые могут выполнять ряд биологических и социальных функций. Это - информация о пище, о вредоносных (или просто неприятных) летучих веществах, о присутствии в среде различных объектов биогенного и абиогенного происхождения и т.д. У человека запах может играть и чисто эстетическую роль - неудивительно, что во всем мире процветает мощная индустрия парфюмерно-косметических изделий. Многие запахи в значительной степени воздействуют на эмоциональную сферу, т.е. имеют ярко выраженную (положительную или отрицательную) эмоциональную окраску.

8.2.1. Психофизические характеристики обоняния

Абсолютные пороги. Под абсолютным порогом понимают минимальное количество (или концентрацию) пахучего вещества, которое вызывает ощущение запаха. Измеряется в граммах, молях или по числу молекул на единицу объема во внешней среде или в носовой полости. Различают *порог неопределенного ощущения* и *порог узнавания запаха*, причем второй несколько выше. Как и для других видов

чувствительности, порог - вероятностная характеристика, и за пороговый уровень, как правило, принимается концентрация одоранта, обнаруживаемая или узнаваемая в 50% случаев.

Разностные (дифференциальные) пороги, так же как и для вкусовой чувствительности, соответствуют минимальной разности концентраций пахучего вещества, которая вызывает едва заметное приращение (или убывание) ощущения запаха.

Относительный дифференциальный порог есть отношение разностного порога к исходной концентрации пахучего вещества. У человека относительный дифференциальный порог довольно высок (на порядок выше аналогичных порогов для зрения и слуха): $\Delta C/C = 0,3 \div 0,6$, т.е. приращение ощущения запаха происходит при увеличении исходной концентрации на 30 - 60%. При низких и высоких концентрациях величина порога возрастает; в области средних концентраций с хорошим приближением выполняется правило Вебера.

Обонятельная (запаховая) адаптация характеризуется увеличением порогов ощущения при длительной стимуляции. Выраженность и временная динамика адаптации зависит от интенсивности и длительности стимуляции, а также качества запаха. Известно явление *гетерогенной адаптации* (снижение чувствительности к веществам со сходным запахом). Гетерогенная запаховая адаптация является своего рода аналогом перекрестной адаптации для вкусовой чувствительности.

Восприятие смеси запахов. При восприятии смеси запахов могут наблюдаться следующие феномены: 1) *слияние запахов* - возникает целостное ощущение нового запаха, не разложимого на составные компоненты; 2) *смешение типа музыкального аккорда* - компоненты могут быть выделены по отдельности, но создают новый целостный образ; 3) *чередование обонятельных ощущений* - два запаха не могут создать целостное ощущение, а воспринимаются по отдельности (аналогично восприятию зрительных изображений с помощью диглоскопа); 4) *маскировка* одним запахом других - доминирующий запах затушевывает все остальные; 5) *компенсация запахов* состоит в том, что два запаха могут восприниматься по отдельности, но при их смешении ощущения запаха вообще не возникает.

8.2.2. Классификации запахов

Известны два основных подхода к классификации запахов: 1) все существующие в природе запахи классифицируются (систематизируются) так, чтобы сходные запахи оказались принадлежащими к одной, а малопохожие - к разным группам (типам, классам и пр.); 2) ведутся поиски определенного, сравнительно небольшого,

числа "основных" запахов, с помощью которых можно было бы провести упорядочение всей совокупности запахов (через сочетание основных). Примером первого подхода может служить классификация Зваардемакера, второго - системы Хеннинга, Крокера и Хендерсона, Эймура и др.

Классификация Зваардемакера

Все существующие в природе запахи можно объединить в девять классов, часть которых включает более мелкие группы (подклассы): 1) *класс эфирных запахов* (простые и сложные эфиры, ацетон, хлороформ и др.); 2) *класс ароматических запахов* включает в себя 5 подклассов - камфарные, пряные, анисовые, лимонные и миндальные; 3) *класс цветочных (бальзамных) запахов* (включает 3 подкласса); 4) *класс амбромускусных запахов*; 5) *класс чесночных запахов* (иприт, люизит и др.); 6) *класс пригорелых запахов* (бензол, фенол, анилин); 7) *класс каприловых запахов* (каприловая кислота); 8) *класс отталкивающих запахов* (пиридин, хинолин и др.); 9) *класс тошнотворных запахов* (индол, скатол и их производные).

"Призма Хеннинга"

Аналогично "вкусовой пирамиде" Хеннинг в 1924 году создал трехмерную модель в виде трехгранной призмы, на вершинах которой располагаются 6 основных запахов (*цветочный, гнилостный, фруктовый, горелый, пряный, смолистый*). Все остальные (промежуточные или комбинированные) запахи располагаются на ребрах и гранях этой призмы (рис.28, б).

В отличие от "пирамиды вкусов", "призме запахов" Хеннинга не повезло. Так, Шиффман и Эриксон на основании многомерного шкалирования пришли к выводу, что расположить все существующие в природе запахи в трехмерном евклидовом пространстве не представляется возможным - для этого необходимо четырех- или даже пятимерное пространство.

Система Крокера и Хендерсона

Каждый запах может быть разложен на четыре основных компонента (*цветочный, гнилостный, кислый и каприловый*). Каждый компонент может иметь 8 ступеней интенсивности (от 0 до 7), и каждый запах выражается четырехзначным числом, цифры которого отражают интенсивность каждого из компонентов. Классификация довольно искусственна и не имеет серьезного теоретического обоснования. Однако она нашла некоторое признание в прикладных областях (дегустация и пр.).

Теория Эймура

Ее называют также *стереохимической теорией запаха*. Эймур различает 7 основных запахов: *камфарный, цветочный, мускусный, мятный, эфирный, едкий и гнилостный* и соответственно семь типов

стереоспецифических активных центров на обонятельных клетках. Согласно Эймуру, основным фактором, определяющим качество (специфичность) запаха, является конфигурация молекулы пахучего вещества, которая, взаимодействуя с активным центром соответствующей конфигурации, подходит к нему "как ключ к замку" и вступает с ним во временное химическое взаимодействие.

Классификация Эймура, ранее считавшаяся неубедительной, получила свое экспериментальное подтверждение и является одним из наиболее перспективных подходов к решению проблемы.

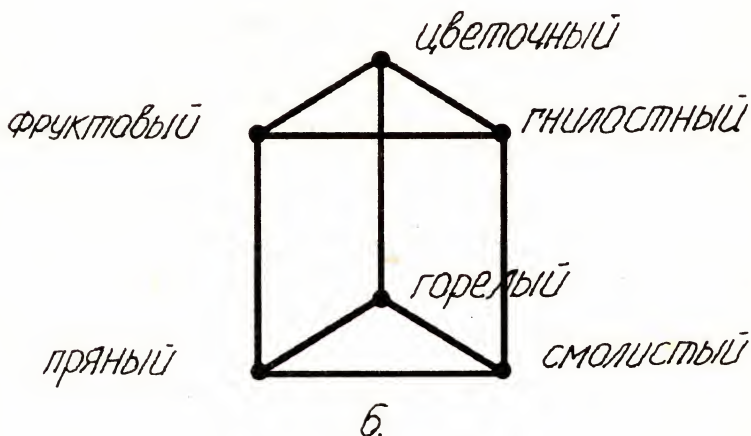
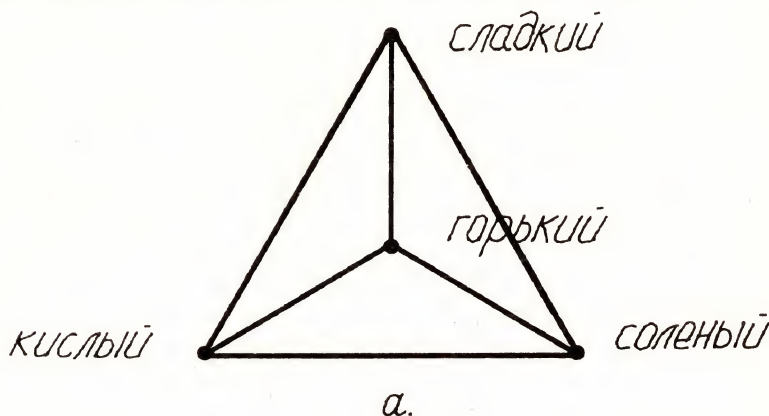


Рис. 28. Модели Хеннинга для вкуса и обоняния: а - "вкусовая пирамида", б - "призма запахов"

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К разделу 1 "Основы общей психофизики":

- Основы сенсорной физиологии* / Под ред. Р.Шмидта. М.: Мир, 1984.
- Кейдель В.* Физиология органов чувств: В 2 т. М.: Мир, 1975.
- Сомьен Дж.* Кодирование сенсорной информации. М.: Мир, 1975.
- Бардин К.В.* Проблема порогов чувствительности и психофизические методы. М.: Наука, 1976.
- Лупандин В.И., Сурнина О.Е.* Основы сенсорной физиологии. Екатеринбург: УрГУ, 1994.
- Лупандин В.И.* Психофизическое шкалирование. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1989.
- Лупандин В.И., Сурнина О.Е.* Субъективные шкалы пространства и времени. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1991.
- Стивенс С.С.* Математика, измерение и психофизика // *Экспериментальная психология* / Под ред. С.Стивенса. М.: Иностран. лит., 1960. Т.1.
- Stevens S.S.* Psychophysics: introduction to its perceptual, neural, and social prospects. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- Baird J.C., Noma E.* Fundamentals of scaling and psychophysics. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- Marks L.E.* Sensory processes. New York, Academic Press, 1974.

К разделу 2 "Психофизика отдельных видов чувствительности":

- Кравков С.В.* Глаз и его работа. М.: Изд-во АН СССР, 1948.
- Кравков С.В.* Цветовое зрение. М.: Изд-во АН СССР, 1951.
- Пэдхем Ч., Сондерс Дж.* Восприятие света и цвета. М.: Мир, 1978.
- Соколов Е.Н., Измайлов Ч.А.* Цветовое зрение. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984.
- Рок И.* Введение в зрительное восприятие: В 2 т. М.: Мир, 1980.
- Альтман Я.А.* Локализация звука. Л.: Наука, 1972.
- Альтман Я.А.* Локализация движущегося источника звука. Л.: Наука, 1983.
- Бронштейн А.И.* Вкус и обоняние. М.; Л., 1950.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Раздел I. Основы общей психофизики	5
1. Краткий очерк истории психофизики	5
1.1. Дофехнеровский период в истории психофизики	5
1.2. Возникновение психофизики как самостоятельной науки. Концепция Фехнера и "основной психофизический закон"	6
1.3. Развитие психофизики в конце XIX - начале XX столетий	8
1.4. "Новая психофизика" С.С.Стивенса: подходы, методы и теоретические конструкты	9
1.5. Современное состояние и актуальные проблемы психофизики	12
2. Психофизика-1: проблема порогов чувствительности	14
2.1. Классическое и современное понятие порога: эволюция взглядов	14
2.2. Методы исследования порогов чувствительности	26
2.3. Теоретические и прикладные аспекты изучения порогов чувствительности ..	34
3. Психофизика-2: сенсорные шкалы	35
3.1. Основные понятия о шкалах измерений	37
3.2. Методы психофизического шкалирования	38
3.3. Эффекты (феномены) шкалирования	42
3.4. Основной психофизический закон и его современная интерпретация	47
Раздел II. Психофизика отдельных видов чувствительности	51
4. Психофизика зрения	51
4.1. Основные физические характеристики света	51
4.2. Восприятие света	53
4.3. Цветовое зрение	58
4.4. Зрительное восприятие пространства	66
5. Психофизика слуха	73
5.1. Восприятие интенсивности звука	74
5.2. Восприятие высоты тона	77
5.3. Восприятие длительности звука	78
5.4. Пространственная локализация звука	79
6. Психофизика кожной чувствительности	80
6.1. Тактильная чувствительность	80
6.2. Температурная чувствительность	82
6.3. Болевая чувствительность	84
7. Психофизика кинестетической и вестибулярной чувствительности	86
7.1. Кинестетическая чувствительность	86
7.2. Вестибулярная чувствительность	89
8. Психофизика вкуса и обоняния	90
8.1. Вкусовая чувствительность	90
8.2. Обоняние	94
Список литературы	98

Владимир Иванович Лупандин
Ольга Ефимовна Сурнина

ПСИХОФИЗИКА

Учебное пособие

Редактор М.А.Овечкина
Технический редактор Э.А.Максимова
Оригинал-макет В.А.Сурнин

ЛР № 020257 от 22.11.96

Подписано в печать 26.05.97. Формат 60 x 84 $\frac{1}{16}$
Бумага для множительных аппаратов. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 6,0. Усл. печ. л. 6,0. Заказ **262** Тираж 500 экз.

Уральский государственный университет им.А.М.Горького.
Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Типолаборатория УрГУ. Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

